

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**SESTROJENÍ STRUNNÉHO NÁSTROJE S
POSUNOVATELNÝMI PRAŽCI**

THE CONSTRUCTION OF A STRING INSTRUMENT WITH SLIDING FRETS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Kotouček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Michal Kotouček

ID: 201710

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Sestrojení strunného nástroje s posunovatelnými pražci

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vyrobte jednoduchý strunný nástroj (může být i elektricky snímáný) s posuvnými odnímatelnými pražci, který díky jim půjde naladit do různých tonálních i mikro tonálních terénů. Dále vytvořte program, který bude umět vypočítat různá ladění a jim odpovídající vzdálenosti pražců na hmatníku nástroje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GEIST, B. Akustika - jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: MUZIKUS s.r.o., 2005. ISBN 978-8086253312.

[2] SYROVÝ, V. Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce popisuje návrh a sestavení strunného nástroje s posunovatelnými pražci a vytvořením programu pro výpočet vzdáleností pražců pro různé ladící systémy. Teoretická část práce se zabývá různými druhy hudebních ladících systémů a popisuje způsob odvození několika ladění od běžně používaných po exotické a experimentální. Praktická část popisuje postup při výrobě nástroje, princip výpočtu vzdáleností pražců a testování přesnosti nastaveného ladění na nástroji.

KLÍČOVÁ SLOVA

strunný nástroj, posunovatelné pražce, hudební ladící systémy, mikrotonální hudba, pražcová kalkulačka, temperovaná ladění

ABSTRACT

This thesis describes the design and construction of a string instrument with movable frets and the creation of a computer program for calculating fret positions for various tuning systems. The theoretical part of the thesis deals with different types of tuning systems and describes the method of deriving several types of tunings, from common to exotic and experimental ones. The practical part describes the procedure of manufacture of the instrument, the principle of calculating fret positions and testing the tuning accuracy of the instrument.

KEYWORDS

string instrument, movable frets, musical tuning systems, microtonal music, fret calculator, musical temperament

KOTOUČEK, Michal. *Sestavení strunného nástroje s posunovatelnými pražci*. Brno, 2021, 68 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Sestrojení strunného nástroje s posuvnými pražci“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat Tomáši Musilovi, Aleši Musilovi a Petru Kotoučkovi za pomoc při konstrukci nástroje.

Obsah

Úvod	10
1 Teoretická část	11
1.1 Úvod do problematiky ladících systémů	11
1.2 Pythagorejské ladění	13
1.3 Přirozené (didymické) ladění	14
1.4 Temperovaná ladění	15
1.4.1 Středotónové ladění	16
1.4.2 Nerovnoměrně temperovaná ladění	16
1.4.3 Rovnoměrně temperované ladění	17
1.5 Centový systém	18
1.6 Exotická ladění	19
2 Praktická část	22
2.1 Konstrukce nástroje	22
2.1.1 Krk	22
2.1.2 Posunovatelné pražce	23
2.1.3 Tělo	25
2.1.4 Hardware	26
2.1.5 Montáž	28
2.1.6 Testování	30
2.1.7 Zvukové vlastnosti nástroje	33
2.1.8 Vyhodnocení konstrukce nástroje	35
2.2 Program pro výpočet poloh pražců	36
2.2.1 Vztahy pro výpočet poloh pražců	36
2.2.2 Řešení programu pražcové kalkulačky	40
2.2.3 Režimy kalkulačky	49
2.2.4 Shrnutí a návrhy k další optimalizaci programu	55
Závěr	56
Literatura	58
Seznam symbolů, veličin a zkratk	61
Seznam příloh	62
A Elektronické přílohy	63

B	Kompletní nástroj	64
C	Kameny s pražci	66
D	Přípravky pro výrobu kamenů s pražci	67
E	Hrubý nákres nástroje	68

Seznam obrázků

1.1	Harmonická řada	11
1.2	Harmonická řada kmitající struny	12
1.3	Kvintový kruh	13
2.1	Krk – zadní strana	23
2.2	Nákres kamenů s pražci a) pražcový drát, b) dřevěný „kámen“, c) komplet	24
2.3	Posuvný kámen s pražcem – části	24
2.4	Tělo – otvor pro elektroniku	25
2.5	Kobylka a struník – původní verze	27
2.6	Nastavitelná kobylka, snímač, ovládací prvky a výstupní konektor	28
2.7	Osázený hmatník s vyznačenými polohami pražců	29
2.8	Nastavení pražců – rovnoměrný temperament, lydická stupnice	30
2.9	Analýza výšky tónu v softwaru Celemony Melodyne 5 Elements	30
2.10	Nastavení pražců – středotónové ladění	31
2.11	FFT – struna <i>a</i> , hra u krku	33
2.12	FFT – struna <i>a</i> , hra u kobylky	34
2.13	FFT – struna <i>a</i> , hra u kobylky, tónová clona	34
2.14	Pražcová kalkulačka: Hlavní menu	49
2.15	Pražcová kalkulačka: Presety – bakalajka	50
2.16	Pražcová kalkulačka: Presety – volba ladícího systému	51
2.17	Pražcová kalkulačka: Výpočet z poměrů	52
2.18	Pražcová kalkulačka: Výpočet z centů	53
2.19	Pražcová kalkulačka: Počet dílů na oktávu	54
B.1	Kompletní nástroj	64
B.2	Kompletní nástroj – krk	65
C.1	Kameny s pražci	66
D.1	Přípravek na výrobu kamenů pro pražce	67
D.2	Přípravek pro úpravu pražcového drátu	67
E.1	Hrubý nákres nástroje	68

Seznam tabulek

1.1	Přirozené ladění – poměry v durové stupnici	14
1.2	Přirozené ladění – poměry v durové stupnici	15
1.3	Přirozené ladění – poměry v aiolské mollové stupnici	15
1.4	Porovnání rovnoměrně temperovaného a pythagorejského ladění . . .	19
1.5	Poměry pro prázce pro nástroj bağlama (saz)	19
1.6	Porovnání poměrů prázce pro nástroj bağlama (saz)	20
1.7	Tóny v turecké hudební teorii [16]	21
2.1	Odchyly při měření přesnosti prázce	31
2.2	Měření odchylek – středotónové ladění	32
2.3	Měření odchylek pro čtvrttóny – rovnoměrně temperované ladění . . .	32
2.4	Vzdálenosti prázce v rovnoměrném temperamentu, $L = 570$ mm . . .	38
2.5	Vzdálenosti od nultého prázce – středotónové ladění, $L = 570$ mm . .	39

Úvod

Běžné nástroje s pevným laděním jsou obvykle přizpůsobeny pouze pro jeden ladící systém. Klávesové nástroje jako např. klavíry nebo varhany je možné přeladit, ale pouze do ladících systémů, které dělí oktávu na dvanáct půltónů. Strunné nástroje s pražci, např. kytary, je nutné za tímto účelem přepražcovat, ale je možné je opražcovat i do ladění, která dělí oktávu na jiný počet dílů než 12 půltónů, což by bylo např. u klavíru dosti problematické [1]. Existují nástroje, které změnu opražcování řeší různými způsoby, řada nástrojů má pražce posuvné, ale existuje například i kytara s vyměnitelným hmatníkem, kterou vlastní španělský kytarista Fernando Perez [2].

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí strunného nástroje s posuvatelnými pražci a vytvořením programu na generování tabulek s rozměry pro opražcování nástroje do různých ladících systémů. Existují nástroje u kterých je možné posouvat pražec pro všechny struny, ale pro opražcování do některých ladících systémů je nutné mít posuvný pražec pro každou strunu zvlášť. Pro tento účel je ideální konstrukce, kde jsou ve hmatníku vyfrézované drážky pod každou strunou, do kterých jsou nasazeny kameny s pražci, které lícují s boky drážky a je možno je v drážce posouvat. V této souvislosti stojí za zmínku osmistrunná klasická kytara s posuvnými pražci, kterou si nechal vyrobit turecký kytarista Tolgahan Çoğulu [3]. Tento nástroj byl hlavní inspirací k tvorbě této práce.

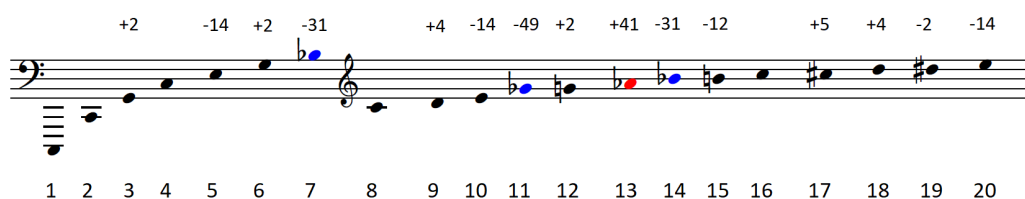
Pro opražcování strunných nástrojů lze použít některou z kalkulaček na spočítání vzdáleností pražců, které je možné najít na internetu [4], ale obvykle jsou omezeny pouze na rovnoměrně temperované ladění a na dvanáct půltónů, tedy bez možnosti vygenerování např. systému v němž je oktáva rozdělena na 24 rovnoměrných čtvrttónů.

1 Teoretická část

1.1 Úvod do problematiky ladících systémů

Pro pochopení principu fungování a vzniku hudebních ladících systémů potřebujeme znát harmonickou řadu. Harmonická řada je posloupnost tónů, které vznikají společně se základním tónem (fundament), frekvence vyšších harmonických odpovídají celočíselným násobkům frekvence fundamentu. Každý zvukový signál lze rozložit jako součet nekonečného množství harmonických složek, které mají sinusový průběh a jejich zastoupení v signálu určuje barvu zvuku. U reálných nástrojů se zastoupení jednotlivých harmonických složek signálu mění v čase.

Frekvence vyšších harmonických složek odpovídají určitým hudebním intervalům a pokud bychom chtěli dosáhnout čistého souzvuku, použili bychom intervaly z harmonické řady. První harmonická složka odpovídá fundamentu, druhá harmonická je dvojnásobek frekvence fundamentu a odpovídá čisté oktávě, třetí harmonická odpovídá kvintě o oktávu výše a tak dále (viz obr. 1.1) [5] [6].



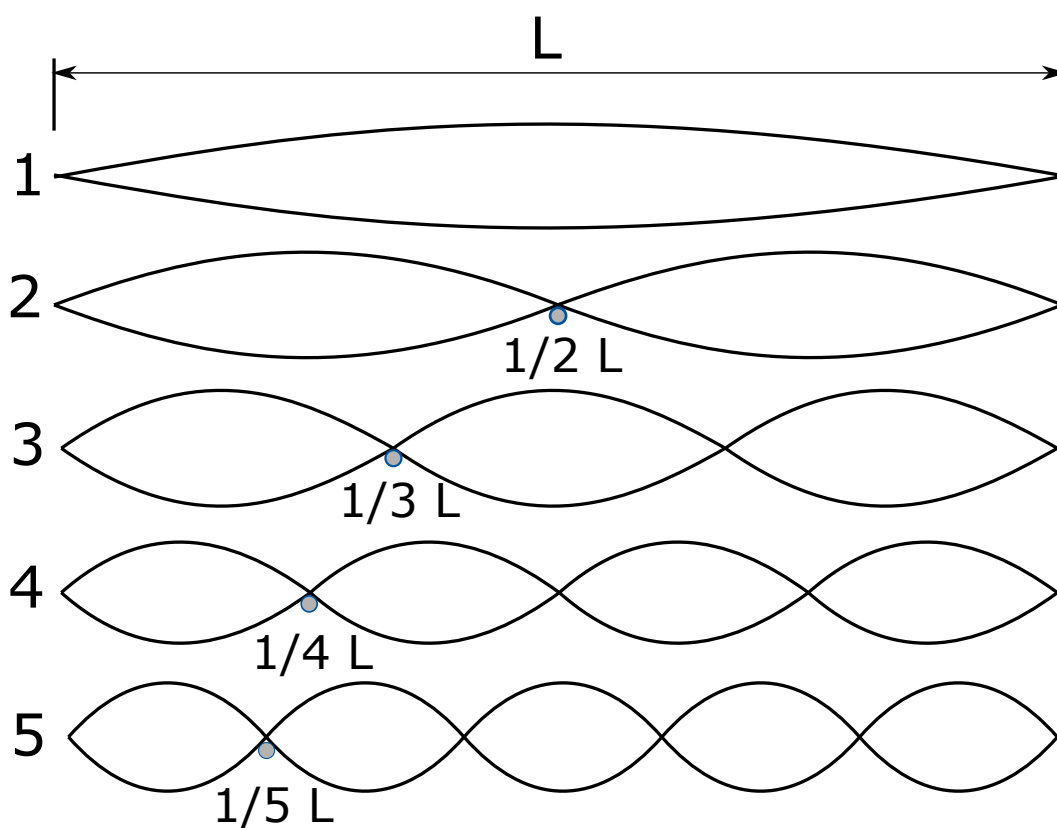
Obr. 1.1: Harmonická řada

Z této řady můžeme určit poměry pro základní hudební intervaly. Například čistá kvinta odpovídá $3/2$ frekvence fundamentu, čistá kvarta $4/3$ frekvence fundamentu. Oproti rovnoměrně temperovanému ladění, které dnes používáme takřka výhradně, jsou všechny intervaly v harmonické řadě kromě oktáv rozladěny, některé z nich docela výrazně, například 11. harmonická, která odpovídá zmenšené kvintě o tři oktávy nad fundamentem, je oproti rovnoměrnému temperamentu o 49 centů níže, což je bezmála celý čtvrttón. Nad notami v obr. 1.1 jsou napsány hodnoty v centech (viz kapitola 1.5) odpovídající rozladění intervalů harmonické řady oproti rovnoměrnému temperamentu [1].

Na obr. 1.2 jsou zobrazeny uzly a kmitny kmitající struny pro prvních 7 harmonických složek. Kmitny jsou místa, kde má struna pro danou harmonickou složku největší výchylku, uzly jsou naopak místa, kde struna nekmitá vůbec. Například pro 2. harmonickou složku se nachází uzel přesně v polovině struny, pro 3. harmonickou

jsou uzly v $1/3$ a $2/3$ struny a tak dále. V praxi se tohoto jevu využívá při hraní flažoletů, kterých dosáhneme tak, že při hraní jemně stiskneme strunu v místě uzlu [5].

V případě snímání struny elektromagnetickým snímačem má na výsledný zvuk velký vliv poloha snímače, protože snímá kmity struny v nějakém konkrétním místě. Pokud bude v tomto místě kmitna některé z harmonických složek, bude tato složka ve výsledném zvuku výrazná, pokud bude v daném místě uzel této harmonické, nebude v podstatě ve výsledném zvuku slyšet. Při hraní na hmatníku ale zkracujeme délku struny, takže je poloha uzlů a kmiten pro každý tón jiná. Obecně ale platí, že čím blíže je snímač ke kobylce, tím ostřejší zvuk (více vyšších harmonických), a čím blíže ke krku, tím je zvuk měkčí, kulatější (méně vyšších harmonických, více fundamentu) [7].

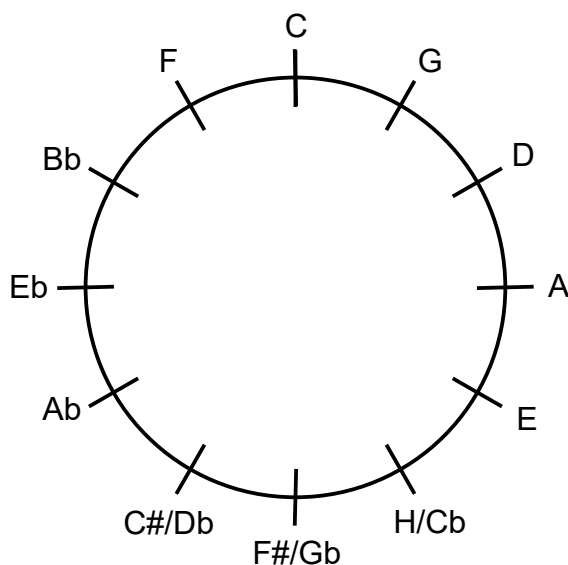


Obr. 1.2: Harmonická řada kmitající struny

1.2 Pythagorejské ladění

Tato ladící soustava vznikla ve starověku a nese jméno řeckého filosofa Pythagora ze Samu. Veškerá Pythagorova nauka se dochovala a šířila pouze ve spisech jeho žáků a stoupenců, proto dnes nelze spolehlivě odlišit, co je přímo naukou Pythagorovou, a co přidali jeho následovníci. Ve starověku byl při pokusech s laděním používán jednostrunný nástroj – tzv. monochord. Poměry mezi jednotlivými intervaly byly hledány pomocí krácení struny. Bylo zjištěno, že zkrátí-li se struna o polovinu, vznikne interval oktávy, zkrátí-li se o třetinu, vznikne kvinta atp. Tyto dva intervaly, oktáva a kvinta, se potom staly základem pro vybudování tónové soustavy [1].

Při konstrukci stupnice tedy využíváme neměnný interval oktávy a kvinty, kterým odpovídají poměry 2. a 3. vyšší harmonické složky. Tón o oktávu vyšší odpovídá dvojnásobku frekvence základního tónu. Třetí harmonická složka odpovídá trojnásobku základního tónu a tvoří interval kvinty o oktávu výše, po posunutí o oktávu dolů zjistíme, že kvinta odpovídá $3/2$ frekvence základního tónu. Pokud bychom začali na tónu c a postupovali v dvanácti kvintových krocích přes celý kvintový kruh (viz obr. 1.3) po směru hodinových ručiček, měli bychom dostat tón c o 7 oktáv výše $(2)^7$, ale výsledný tón $his \left(\frac{3}{2}\right)^{12}$ je o něco vyšší než c , rozdíl mezi těmito tóny nazýváme *Pythagorejské komma* [1][8][9].



Obr. 1.3: Kvintový kruh

Pokud bychom chtěli sestavit celou enharmonickou stupnici o 22 členech, museli bychom sestavit všechny tóny diatonické stupnice a také všechny tóny s „křížky“ a s „béčky“.

Pokud postupujeme kvintovými kroky v kvintovém kruhu po směru hodinových ručiček, dostaneme tóny *g, d, a, e, h, fis, cis, gis, dis, ais, eis, his*. Pro získání ostatních tónů musíme postupovat proti směru hodinových ručiček po kvartách (respektive kvintové kroky směrem dolů od základního tónu). Tím dostaneme zbylé tóny *f, b, es, as, des, ges, ces* a můžeme sestavit stupnici [1]:

c cis des d dis es e fes eis f fis ges g gis as a ais b h ces his c₁.

Pokud je nástroj, který chceme do této ladící soustavy naladit, omezen pouze na 12 půltónů, není možné na něm naladit například jak tón *fis*, tak *ges*. V tom případě je nutné udělat nějaký kompromis, což obvykle znamená, že po směru hodinových ručiček v kvintovém kruhu skončíme např. u tónu *gis* a opačným směrem u tónu *es*. Takže dostaneme posloupnost tónů:

c cis d es e f fis g gis a b h.

Výsledné poměry potom odpovídají údajům v tabulce 1.1.

tón	c	cis	d	es	e	f
poměr	1/1	2187/2048	9/8	32/27	81/64	4/3
tón	fis	g	gis	a	b	h
poměr	729/512	3/2	6561/4096	27/16	16/9	243/128
						c ₁
						2/1

Tab. 1.1: Přirozené ladění – poměry v durové stupnici

1.3 Přirozené (didymické) ladění

Didymické ladění, často označované jako *přirozené* nebo *čisté* ladění, v anglické literatuře *just intonation*, je ladící soustava odvozená od tzv. přirozené řady tónů, které zaznívají s každým základním tónem jako vyšší harmonické složky [10].

Oktáva tedy odpovídá poměru 2/1, kvinta 3/2, kvarta 4/3, velká tercie 5/4, malá tercie 6/5, velká sekunda 9/8. Sextu spočítáme jako kvartu + velkou tercii: $4/3 \cdot 5/4 = 5/3$, septimu jako kvintu + velkou tercii: $3/2 \cdot 5/4 = 15/8$ [1]. Pokud si zvolíme jako základní tón *c*, dostaneme diatonickou stupnici *c dur* (viz tabulka 1.2).

Můžeme si všimnout, že mezi tóny *c – d* a *d – e* je interval celého tónu, avšak poměry nejsou stejné. Z toho vyplývá, že v přirozeném ladění jsou dva druhy celého tónu: velký celý tón (9/8) a malý celý tón (10/9) [1].

V přirozené řadě tónů můžeme najít i interval malé tercie, který se v durové stupnici nenachází, avšak podobným způsobem můžeme vytvořit i stupnici mollovou. Malou sextu získáme odečtením velké tercie od oktávy, tj. $2 : 5/4 = 8/5$ a přičtením kvinty a malé tercie získáme malou septimu: $3/2 \cdot 6/5 = 9/5$ [10].

Poměry od základního tónu								
tón	c	d	e	f	g	a	h	c ₁
interval	prima	sekunda	tercie	kvarta	kvinta	sexta	septima	oktáva
poměr	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2

Poměry mezi tóny							
tóny	c – d	d – e	e – f	f – g	g – a	a – h	h – c ₁
poměr	9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15
interval	celý tón	celý tón	půltón	celý tón	celý tón	celý tón	půltón

Tab. 1.2: Přirozené ladění – poměry v durové stupnici

Poměry od základního tónu								
tón	c	d	es	f	g	as	hes	c ₁
interval	prima	sekunda	tercie	kvarta	kvinta	sexta	septima	oktáva
poměr	1	9/8	6/5	4/3	3/2	8/5	9/5	2

Poměry mezi tóny							
tóny	c – d	d – es	es – f	f – g	g – as	as – hes	hes – c ₁
poměr	9/8	16/15	10/9	9/8	16/5	9/8	10/9
interval	celý tón	celý tón	půltón	celý tón	celý tón	celý tón	půltón

Tab. 1.3: Přirozené ladění – poměry v aiolské mollové stupnici

1.4 Temperovaná ladění

Přirozené ladění je možné využít u nástrojů s plynulým laděním a zpěváků, ale zhotovit v tomto ladícím systému nástroje s pevným laděním (např. klavíry, kytary atd.) je značně problematické a právě z tohoto důvodu se děly pokusy dojít k ladění, které by rozladovalo buď jen některé přirozené intervaly nebo všechny stejně při zachování čistého nejzákladnějšího poměru – oktávy [1].

Pythagorejské ladění také není pro tyto účely ideální a některé intervaly jsou od *čistých* příliš vzdálené, například velká tercie, která je v *pythagorejském* ladění (81/64), od velké tercie v *přirozeném* ladění (5/4). Rozdíl mezi těmito intervaly je tzv. *syntonické komma* a jeho velikost odpovídá poměru (81/80) [8] [9].

Temperovaná ladění potom vycházejí z principu *pythagorejského* ladění, tedy skládání kvint, které jsou ale mírně rozladěny. Rozladěny mohou být podle druhu ladícího systému buď všechny kvinty stejným způsobem – stejnoměrně nebo nerovnoměrně, tzn. buď jsou rozladěny jen některé kvinty nebo se velikost rozladění pro jednotlivé kvinty liší [11].

1.4.1 Středotónové ladění

Středotónové ladění řeší problém širokých pythagorejských tercií mírným zmenšením kvint udávaném jako zlomek *syntonického kommatu*, čímž dojde zároveň ke zmenšení tercií. V případě středotónového ladění temperujícího o $1/4$ *syntonického kommatu* bychom při určení jednotlivých intervalů postupovali následovně:

$$\frac{3}{2} : \sqrt[4]{\left(\frac{81}{80}\right)} = \sqrt[4]{5}. \quad (1.1)$$

Poměr $(3/2)$ odpovídá kvintě v *pythagorejském ladění* a tuto kvintu zmenšujeme o jednu čtvrtinu *syntonického kommatu* $\sqrt[4]{(81/80)}$ [12] [13].

Podobně bychom postupovali u velké tercie, která v pythagorejském ladění odpovídá zlomku $(81/64)$:

$$\frac{81}{64} : \sqrt[4]{\left(\frac{81}{80}\right)} = \frac{5}{4}. \quad (1.2)$$

Z toho vyplývá, že ve středotónovém ladění ($1/4$ komma) mají velké tercie stejnou velikost jako v *přirozeném* ladění. Narozdíl od přirozeného ladění, kde jsou dva druhy celých tónů – velký celý tón $(9/8)$ a malý celý tón $(10/9)$, ve středotónovém existuje pouze jeden celý tón, který se nachází přímo ve *středě* (pouze u $1/4$ komma) mezi těmito intervaly. Proto se ladění nazývá středotónové [13].

Existuje více druhů tohoto ladění, které se liší hodnotou zlomku *syntonického kommatu*, např. $1/6$, $1/5$ nebo $2/7$ komma. Nejběžnější je $1/4$ *syntonického kommatu*. Pokud bychom temperovali přibližně o $1/11$ *syntonického kommatu*, dostali bychom rovnoměrně temperované ladění (viz kapitola 1.4.3) [12][13].

1.4.2 Nerovnoměrně temperovaná ladění

Ve snaze docílit lepšího souzvuku a eliminaci disonantních intervalů při přechodu do vzdálenějších tónin byly konstruovány také ladící systémy, které nazýváme jako nerovnoměrně temperované. Jejich princip spočívá, podobně jako u středotónového ladění, v rozladění kvint, v tomto případě však nerovnoměrně. To znamená, že nerozladíme všech 12 kvint stejně, ale například některé zmenšíme a některé ponecháme čisté nebo některé kvinty zmenšíme a jiné zvětšíme. Mezi nerovnoměrně temperované ladící systémy se řadí například Werckmeisterova ladění (III.–VI.) nebo Kirnbergerova ladění (I.–III.). Například v ladícím systému Werckmeister III. jsou kvinty *c–g*, *g–d*, *d–a* a *h–fis* zmenšené o $1/4$ *pythagorejského kommatu*, ostatní kvinty jsou čisté – odpovídají poměru $3/2$ [14][15].

1.4.3 Rovnoměrně temperované ladění

Po celý starověk a téměř celý středověk platila *Pythagorejská soustava* (viz kapitola 1.2), která byla pro účely jednohlasé hudby dostačující. S nástupem vícehlasé hudby již však byl kladen větší důraz na souzvuk tónů a harmonickou výstavbu hudby. Postupem času byla využívána různá *nerovnoměrně temperovaná* ladění, která měla za úkol upravit především výšku tercií, které v *pythagorejském* ladění zněly poněkud disonantně. Dalším krokem ve vývoji *temperovaných* ladění byl vynález *rovnoměrného temperamentu*, který dělí oktávu na dvanáct rovnoměrně rozložených půltónů, přičemž všechny intervaly kromě oktáv jsou vzhledem k *čistému* ladění lehce rozladěny [1].

Pro frekvenci f_n tónu, který se nachází o n půltónů výše než základní tón o frekvenci f , platí vztah:

$$f_n = f \cdot \sqrt[12]{2^n}. \quad (1.3)$$

Z rovnoměrného rozložení vyplývá, že jsou intervaly stejně velké a při přechodu do jiných tónin nedochází ke vzniku disonantních intervalů, například kvinta je vždy stejně velká (700 centů) a nezáleží od kterého tónu vycházíme. Díky tomu můžeme modulovat do libovolné tóniny, aniž by výsledek zněl rozladěně. Temperované ladění umožňuje enharmonickou záměnu zvýšených a snížených tónů, což značně rozšiřuje možnosti harmonie.

Kromě rozdělení oktávy na 12 rovnoměrných dílů můžeme oktávu dělit i na jiný počet rovnoměrných dílů. Častým jemnějším dělením oktávy je tzv. čtvrttónové, kdy je oktáva rozdělena na 24 rovnoměrných dílů – čtvrttónů. Tento systém hojně využíval například český hudební skladatel Alois Hába. Oktávu můžeme dělit na libovolný počet dílů, například na třetinotóny (18 rovnoměrných dílů) nebo šestinotóny (36 rovnoměrných dílů) [1].

Platí zde stejný vztah jako ve vzorci 1.3, pouze za x dosadíme počet dílů na oktávu:

$$f_n = f \cdot \sqrt[x]{2^n}. \quad (1.4)$$

Pro čtvrttónový systém by pak vztah vypadal následovně:

$$f_n = f \cdot \sqrt[24]{2^n}. \quad (1.5)$$

V rovnoměrně temperovaném ladění můžeme stavět klavíry, varhany a další nástroje s pevným laděním, ale zpěváci a hráči na smyčcové a dechové nástroje, u nichž výška tónu není pevně vymezena, intonují podle přirozeného ladění. Přirozenost zde ale neplatí doslova, zvýšené tóny se obvykle intonují výše a snižené níže, ačkoli podle principu *přirozeného* ladění by tomu mělo být přesně naopak [1].

1.5 Centový systém

Centová soustava vychází z temperovaného ladění, v něm zavádí další dělení půltónu, a to na 100 rovnoměrných dílů. Oktáva má v rovnoměrně temperovaném ladění 12 půltónů, z toho vyplývá, že intervalu oktávy odpovídá 1200 centů, intervalu kvinty 700 centů atd. Pro kmitočet f platí vztah:

$$f = f_0 \cdot 2^{x/1200}, \quad (1.6)$$

kde f_0 je frekvence základního tónu a x počet centů [1].

Centová soustava je velice cenným nástrojem při zkoumání ladících systémů. Pomocí centové soustavy můžeme vyjádřit rozladění intervalu v kterémkoliv ladícím systému vzhledem k *rovnoměrně temperovanému* ladění a můžeme je tak snadno porovnat. Pomocí vzorce 1.7, který jsme dostali úpravou vzorce 1.6, můžeme vypočítat rozdíl mezi např. pythagorejským laděním a rovnoměrně temperovaným:

$$x = 1200 \cdot \log_2 \left(\frac{f}{f_0} \right), \quad (1.7)$$

kde x odpovídá rozdílu v centech, f odpovídá frekvenci (poměru) tónu v pythagorejském ladění a f_0 je frekvence (poměr) stejného tónu v rovnoměrně temperovaném ladění. Výslednou hodnotu, kterou můžeme vidět v tabulce 1.4, dostaneme po přičtení rozdílu k centové hodnotě intervalu v rovnoměrně temperovaném ladění [1].

Velkou pomocí je také centová soustava při studiu běžné hudební praxe, kdy můžeme změřit např. o kolik se liší interpretované tóny od odpovídajících tónů v chromatické stupnici. V rámci orchestrů dochází ke vzniku rozdílů v ladění mezi jednotlivými sekcemi i v rámci těchto sekcí a pomocí centů můžeme vyjádřit například rozptyl ladění v rámci skupiny nástrojů v orchestru [1].

–	Rovnoměrný temperament	pythagorejské ladění
interval	[c]	[c]
velká sekunda	200	203,91
malá tercie	300	294,135
velká tercie	400	407,82
kvarta	500	498,045
kvinta	700	701,955
velká sexta	900	905,865
velká septima	1100	1109,775
oktáva	1200	1200

Tab. 1.4: Porovnání rovnoměrně temperovaného a pythagorejského ladění

1.6 Exotická ladění

Mimo u nás obvyklé dvanácti-půltónové soustavy existuje obrovské množství soustav, které jsou konstruovány úplně jiným způsobem. Jde například o soustavy vytvořené za účelem experimentu a nebo o soustavy používané v hudební praxi různých především mimoevropských kultur a subkultur.

Například v turecké klasické hudbě existují tzv. *makamy*, což jsou jakási pravidla pro komponování a reprodukci hudby. Každý *makam* má jinou intervalovou strukturu. V turecké hudební teorii je oktáva rozdělena na 53 rovnoměrných dílů. Velikost jednoho kroku odpovídá hodnotě $\sqrt[53]{2}$, která je označována jako *Holderovo komma* [16].

V tabulce 1.7 můžeme vidět několik intervalů používaných v turecké hudbě. Intervaly jsou definovány jako násobky *holderova kommatu*. V tabulce jsou uvedeny velikosti intervalů vzhledem k základnímu tónu a nejbližší interval v rovnoměrně temperovaném ladění.

Pražec č.		1	2	3	4	5	6	7	8
poměr		18/17	12/11	9/8	81/68	27/22	81/64	4/3	24/17
Pražec č.	9	10	11	12	13	14	15	16	17
poměr	16/11	3/2	27/17	18/11	27/16	16/9	32/17	64/33	2/1

Tab. 1.5: Poměry pro pražců pro nástroj bağlama (saz)

Jedním ze strunných nástrojů, které jsou hojně využívány právě například v turecké hudbě, je saz (neboli bağlama), který má 17 pražců na jednu oktávu. Nejde ovšem o 17 rovnoměrných dílů, ale kromě půltónových kroků se zde nachází několik mikrotónálních intervalů blízkých čtvrttónům. Polohy pražců jsou určeny pomocí poměrů, které můžeme vidět v tabulce 1.5 [17].

–	původní ladění	čtvrttón. soustava
pražec č.	poměr k základnímu tónu	poměr k základnímu
1	1,058824	1,059463
2	1,090909	1,090508
3	1,125	1,122462
4	1,191176	1,189207
5	1,227273	1,224054
6	1,265625	1,259921
7	1,333333	1,33484
8	1,411765	1,414214
9	1,454545	1,455653
10	1,5	1,498307
11	1,588235	1,587401
12	1,636364	1,633915
13	1,6875	1,681793
14	1,777778	1,781797
15	1,882353	1,887749
16	1,939394	1,943064
17	2	2

Tab. 1.6: Porovnání poměrů pražců pro nástroj bağlama (saz)

V dnešní době však výrobci těchto nástrojů často nastavují pražce podle odpovídajících intervalů ve čtvrttónové soustavě (rovnoměrně temperované ladění). V tabulce 1.6 jsou uvedeny poměry z tabulky 1.5 v desetinných místech a hodnoty pro stejné intervaly ve čtvrttónové soustavě.

Další z hudebního hlediska zajímavým místem je například severní Indie. Jeden z tradičních místních nástrojů zvaný sitár má obvykle kolem dvaceti obloukových pohyblivých pražců a 18–23 strun. Struny jsou rozděleny do dvou skupin. Na první skupinu se hraje drnkáním a je možné při hraní využívat pražce. Tato skupina se ještě dělí na „normální“ struny a struny čikarí, které vytváří charakteristický bzučivý zvuk. Druhou skupinou strun jsou potom rezonanční (souznějící) struny, které jsou vedeny pod pražci [18][19].

Jméno tónu	interval [komma]	interval [c]	nejbližší tón v r. t.
KABA ÇÂRGÂH	0	0	C ₁
Kaba Nim Hicâz	4	91	C _{#1} /D _{b1}
Kaba Hicâz	5	113	C _{#1} /D _{b1}
Kaba Dik Hicâz	8	181	D ₁
YEGÂH	9	204	D ₁
Kaba Nim Hisâr	13	294	D _{#1} /E _{b1}
Kaba Hisâr	14	317	D _{#1} /E _{b1}
Kaba Dik Hisâr	17	385	E ₁
HÜSEYNÎ AŞÎRÂN	18	408	E ₁
ACEM AŞÎRÂN	22	498	F ₁
Dik Acem Aşîrân	23	521	F ₁
Irak	26	589	F _{#1} /G _{b1}
Gevest	27	611	F _{#1} /G _{b1}
Dik Gevest	30	679	G ₁
RAST	31	702	G ₁
Nim Zîrgüle	35	792	G _{#1} /A _{b1}
Zîrgüle	36	815	G _{#1} /A _{b1}
Dik Zîrgüle	39	883	A ₁
DÜĞÂH	40	906	A ₁
Kürdi	44	996	A _{#1} /H _{b1}
Dik Kürdi	45	1019	A _{#1} /H _{b1}
Segâh	48	1087	H ₁
BÛSELIK	49	1109	H ₁
Dik Bûselik	52	1177	C ₂
ÇÂRGÂH	53	1200	C ₂

Tab. 1.7: Tóny v turecké hudební teorii [16]

2 Praktická část

Následující část je věnována návrhu nástroje, konstrukci jeho jednotlivých částí, kompletaci a následnému testování. Další část je věnována odvození vztahů pro výpočet poloh pražců a programování finální pražcové kalkulačky řešené pomocí jazyků HTML, JavaScript a CSS. V závěru kapitoly jsou popsány jednotlivé funkce pražcové kalkulačky a jejich využití.

2.1 Konstrukce nástroje

Jedná se o drnkací třístrunný nástroj, který bude mít posuvné pražce pro každou strunu zvlášť a bude možné jej přepražcovat do různých ladících systémů. Pro první oktávu na každé struně by mělo být možné osadit hmatník po čtvrttónech.

Systém posuvných pražců byl inspirován kytarou, kterou si nechal vyrobit turecký kytarista Tolgahan Çoğulu [3]. Tato kytara má ve hmatníku pod každou strunou vyfrézované drážky, do kterých jsou zasazeny kameny s pražci, které lze podle potřeby různě posouvat, případně přidávat další nebo odebírat. Díky tomu lze nastavit na kytaru prakticky jakékoli pevné ladění. Jedinou limitací je délka kamenů, pokud bychom chtěli udělat ladění s co nejjemnějšími kroky.

Nástroj, kterému je věnována tato práce principem fungování posuvných pražců vychází z této „upravené“ klasické kytary, ale jedná se o vlastní návrh nástroje, který tvarem těla připomíná loutnu. Jeho tělo je zhotoveno z plného materiálu, jako je tomu u elektrických kytar, o snímání zvuku se stará elektromagnetický snímač. Protože má nástroj tři struny, stejně jako balalajka, byť jinak laděné, bylo pro něj zvoleno jméno „bakalajka“.

2.1.1 Krk

Krk včetně hmatníku byl zkonstruován z jednoho kusu javorového dřeva, základní tvar včetně drážek byl zhotoven pomocí kotoučové pily, hrubé zaoblení zadní strany krku potom pomocí ruční frézky. Finální profil krku byl potom dokončen ručně pomocí pilníků a smirkového papíru, stejně jako tvar hlavy. Profil krku přibližně odpovídá profilu, který se u elektrických kytar označuje jako „U“ a je běžný např. u elektrických kytar typu telecaster [20].

Pro výpočet hustoty dřeva ρ bylo nutné změřit hmotnost, vypočítat objem hrubého tvaru krku a následně tyto parametry dosadit do vzorce:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.1)$$

kde m odpovídá hmotnosti a V objemu měřeného kusu dřeva. Výsledná hustota odpovídá v tomto případě přibližně $590 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Z hustoty můžeme pomocí následujícího vzorce určit akustickou konstantu K_A [21]:

$$K_A = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}, \quad (2.2)$$

kde E je Youngův modul pružnosti. Po dosazení hustoty z předchozího bodu a dosazení Youngova modulu pružnosti pro směr rovnoběžně s vlákny z tabulky (viz [21], str. 271) vyjde hodnota akustické konstanty přibližně $K_A = 6,8 \text{ m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Rozměry drážek ve hmatníku byly vzhledem k možnostem výroby zvoleny takto: šířka drážky 5 mm, výška 8 mm. Drážky byly proříznuty skrz celou délku hmatníku, materiál mezi drážkami má šířku 6 mm, tím pádem rozteče mezi drážkami (zároveň i mezi strunami) jsou 11 mm. Celková šířka hmatníku v místě nultého pražce je 43 mm.

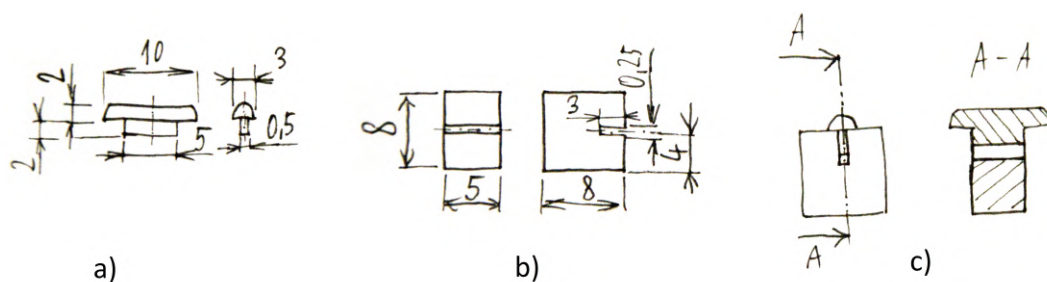


Obr. 2.1: Krk – zadní strana

2.1.2 Posunovatelné pražce

Kameny s pražci byly vyrobeny ze slabých javorových latěk, do kterých se poté připevnil pražcový drát. Latky byly nařezány na kotoučové pile tak, aby průřez odpovídal rozměrům drážky ($8 \times 5 \text{ mm}$). Na obrázku 2.2 je nákres kamene s pražcem a jeho části, hotový je potom zobrazen na fotografii (viz obr. 2.3).

Při řezání latěk na délku kamenů, která by měla být pro všechny kameny stejná, by bylo odměřování každého kusu zdlouhavé, proto byl zhotoven přípravek (viz příloha D.1) s dorazem a dvěma drážkami pro pilku. Pilkou do latky nejprve vyřízneme drážku na pražec a následně seřízneme na požadovaný rozměr. Základní délka kamene byla zvolena 8 mm. Pokud by byly kameny delší, lépe by se v drážce posouvaly, to by ale znemožňovalo osázet hmatník hustěji. Pokud bychom chtěli opražcovat hmatník například do šestinotónů nebo jemněji, bylo by nejspíše nutné vyrobit naopak ještě slabší kameny.



Obr. 2.2: Nákres kamenů s pražci a) pražcový drát, b) dřevěný „kámen“, c) komplet

Pražcový drát je také potřeba uříznout na určitou délku a především odpilovat přebytečnou část „stopky“, která nebude zapuštěna do kamene. Za tímto účelem byl opět zhotoven přípravek (viz příloha D.2), do kterého se pražcový drát upne, odpiluje se „stopka“ na jedné straně, zkrátí se na požadovanou délku (10 mm), uříznutý kus se otočí a odpiluje se přebytečný materiál na druhé straně.

Poté můžeme pražcový drát „naklepnout“ do kamene, důležité je použít na naklepnutí kladívko z nějakého materiálu měkčího než je materiál pražcového drátu, aby se při naklepávání pražec nezdeformoval. Běžně se při opražcování kytar naklepnutý či nalisovaný pražec ještě pojistí nějakým lepidlem, ale v našem případě pražec držel i bez toho, takže nebylo nutné jej lepit. To sice pro účely odzkoušení stačí, ale při časté manipulaci by mohlo dojít k uvolnění, takže při výrobě dalších kusů už bude spoj pojištěn lepidlem.



Obr. 2.3: Posuvný kámen s pražcem – části

Nakonec je nutné upravit boky kamene tak, aby dobře seděl do drážky. Laťky ani boky drážky nejsou po celé své délce ideálně široké a laťka se také může při řezání nebo naklepávání pražce lehce zdeformovat. Vzhledem k tolerancím výroby se zároveň může stát, že v jedné drážce bude kámen sedět příliš těsně a ve druhé bude naopak příliš volný. V případě, že by rozdíly v rozměrech drážek byly hodně

výrazné, bylo by nutné buď vyrábět kameny pro každou drážku zvlášť nebo se pokusit rozměr drážky nějakým způsobem opravit. Je však třeba dát si pozor, aby nevznikly výrazné rozdíly v šířce v rámci jedné drážky.

2.1.3 Tělo

Tělo bylo slepeno ze tří kusů lipového dřeva. Z rozměrů polotovaru a hmotnosti byla určena hustota, stejně jako v kapitole 2.1.1. Výsledná hustota tohoto dřeva odpovídá přibližně $440 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Po načrtnutí tvaru těla na desku bylo třeba vyfrézovat otvor pro krk a následně otvor pro elektroniku. Poté bylo třeba oříznout tvar těla. Původně měla být pro tento účele použita přímočará pila, ale deska o tloušťce přes 40 mm byla pro tuto pilu moc široká, proto byl nakonec hrubý tvar vyříznut na kotoučové pile a hrany vyhlazeny na brusce. Následně byly ruční frézou hrany těla z přední i zadní strany ofrézovány na radius 5 mm.



Obr. 2.4: Tělo – otvor pro elektroniku

2.1.4 Hardware

Běžné kytarové ladící mechaniky fungují na principu šnekového soukolí a jejich výroba by byla zbytečně složitá. Poměrně slušné kytarové ladící mechaniky je dnes možné zakoupit i za přibližně 500 korun za sadu šesti kusů. Proto byly na tomto nástroji použity kytarové ladící mechaniky. Při návrhu bylo zvoleno umístění ladících mechanik tak, že jsou dvě na horní straně hlavy a jedna na spodní straně. Proto bylo třeba zakoupit sadu, která je dělaná pro kytary s třemi kolíky na každé straně a z nich vybrat ty správné tři.

Dále je třeba v něčem struny uchytit na druhé straně. V tomto případě byla zvolena varianta struníku a kobylky (viz obr. 2.5), jako je např. u mandolíny [22]. Tento systém spočívá v tom, že struny jsou uchyceny ve struníku, který je přišroubován k tělu nástroje, struny dále prochází přes kobylku, která je volná a drží na těle pouze díky tahu strun. U tohoto typu kobylky je možné snadno seřídít intonaci oktáv na rozdíl od pevných kobytek, které se používají například u většiny akustických kytar.

Prototyp kobylky byl poté vyroben z kusu třeshňového dřeva, tvarem podle vzoru kobylky na mandolíně. Tato kobylka není nijak výškově nastavitelná, proto byla její výška původně zvolena raději vyšší (20 mm) s tím, že se po odzkoušení případně zmenší. Do kobylky byly vypilovány tři drážky pro struny. Struník byl vyroben z ohnutého nerezového plechu o tloušťce 2 mm. Do plechu byly dále vyvrtány čtyři otvory se zahlobením pro vruty. Tvar struníku byl upraven pomocí pilníků a následně obroušen jemným smirkovým papírem a vyleštěn.

Po odzkoušení vyšlo najevo, že v případě tohoto nástroje, kde kobylku drží na místě tah pouze tří strun, bude nutné zvolit jinou konstrukci (viz obr. 2.6). Zvláště po nalakování těla bylo velice jednoduché s kobylkou při hraní omylem pohnout. Proto byla navržena varianta kobylky, která je k tělu uchycená dvěma vruty v drážkách a po povolení vrutů je možno s kobylkou pohnout přibližně o 5 mm dozadu nebo dopředu. Dále je kobylka výškově nastavitelná, skládá se ze dvou dřevěných dílů a šroubů s matkami. Oba dřevěné díly kobylky byly vyrobeny z třeshňového dřeva. Do spodního dílu byly vyvrtány dva otvory, do kterých byly zasazeny šrouby se závitem M5 a obroušenou hlavou tak, aby se neotáčely. Po zasazení šroubů byly díry ze spodní strany zality lepidlem na bázi epoxidové pryskyřice. V horním dílu kobylky jsou vyvrtány dva otvory, kterými se nasadí na spodní díl se šrouby a matkami. Pomocí otáčení s matkami je možno zvedat nebo snižovat výšku horního dílu kobylky.

Snímání nástroje je řešeno pomocí elektromagnetického snímače, konkrétně jednocívkového (tzv. single-coil). Single-coil snímače mají obvykle ostřejší zvuk s více detaily [23]. Zároveň potřebujeme pro tento nástroj snímač stavěný pro nástroj s po-



Obr. 2.5: Kobylka a struník – původní verze

dobným laděním, aby vyhovoval po stránce výsledné barvy zvuku, tzn. snímače pro nástroje jako např. *mandolína* nebo *bouzouki*, které se vyrábí především jednocívkové. Dalším problémem ve výběru je počet strun. Pravděpodobně nejlepší volbou ze sériově vyráběných dílů bude snímač pro řecký nástroj *tzouras*, který má tři skupiny strun po dvou [24].

Poloha snímače byla zvolena přibližně 6 cm od krku jako taková střední cesta mezi ostrým zvukem u kobylky a měkčím zvukem u krku. Snímač byl uchycen do rámečku z třesňového dřeva, aby byl blíže strun. V místě pod rámečkem byl do těla provrtán otvor pro vedení kabelu do otvoru pro elektroniku, kde je snímač připojen k potenciometru *volume* pro nastavení hlasitosti a potenciometru *tone* pro nastavení tónové clony a k výstupnímu TS konektoru. Stěny otvoru pro elektroniku jsou kvůli odstranění nežádoucího rušení polepeny hliníkovou fólií, která je připojena na zem. Zároveň je z těchto důvodů k zemi připojen i struník.



Obr. 2.6: Nastavitelná kobylka, snímač, ovládací prvky a výstupní konektor

2.1.5 Montáž

Pro připevnění krku k tělu byl zvolen lepený spoj, konkrétně jednosložkovým lepidlem na dřevo (Kleiberit 303). Nultý pražec vyříznutý z kusu plastové destičky byl do drážky na krku také přilepen, ale v tomto případě dvousložkovým lepidlem na bázi pryskyřice.

Pro připevnění ladících mechanik na hlavu nástroje je nutné vyvrtat díry o průměru 10 mm, do kterých se nasunou ladící strojky, z přední strany se pojistí matkou s podložkou a zezadu vrutem.

Struník je přišroubován k tělu pomocí čtyř vrutů. Volná kobylka byla původně zvolena proto, že v případě tohoto poměrně netypického nástroje neexistuje žádná hotová kobylka s potřebnými parametry a zároveň tato možnost vypadala jako nejjednodušší řešení. Podobná konstrukce kobylek se používá např. u mandolín. Alternativně by bylo možné zakoupit posuvné kameny do kobylek pro elektrické kytary (je možné je zakoupit i samostatně) a upevnit je na kus ohnutého plechu, ale pro tuto možnost by musel být nástroj zkonstruován jinak.

Po odzkoušení funkčnosti bylo třeba nástroj nalakovat. Důležité bylo zajistit, aby se lak nedostal do drážek, mohlo by se tak zhoršit lícování, případně by na nalakovaném povrchu nemusely kameny s pražci dobře držet. Celý hmatník byl proto při lakování přelepen páskou, po nalakování nástroje byla páska odstraněna

a hmatník napuštěn lněným olejem. Následně byly do boků hmatníku vyznačeny horkým hrotem páječky polohy pražců v rovnoměrně temperovaném ladění a značky poloh (viz obr. 2.7).



Obr. 2.7: Osázený hmatník s vyznačenými polohami pražců

Při prvním testování nástroje byly použity pro odzkoušení struny g , h a e_1 ze sady pro akustickou kytaru, protože bylo potřeba nástroj na něčem odzkoušet. Předpokládanou nejvhodnější variantou pro elektromagnetické snímání byly struny pro elektrické kytary.

Po nainstalování snímače už byly použity struny pro elektrickou kytaru, konkrétně struny g , h a e_1 ze sady 11-52. Tloušťky použitých struny byly 11, 14 a 18 tisícín palce. Struny pro akustickou kytaru se ukázaly jako vyloženě nevhodné, protože opletená struna g měla jiný zvuk a hlavně slabší signál než neopletené struny h a e_1 .

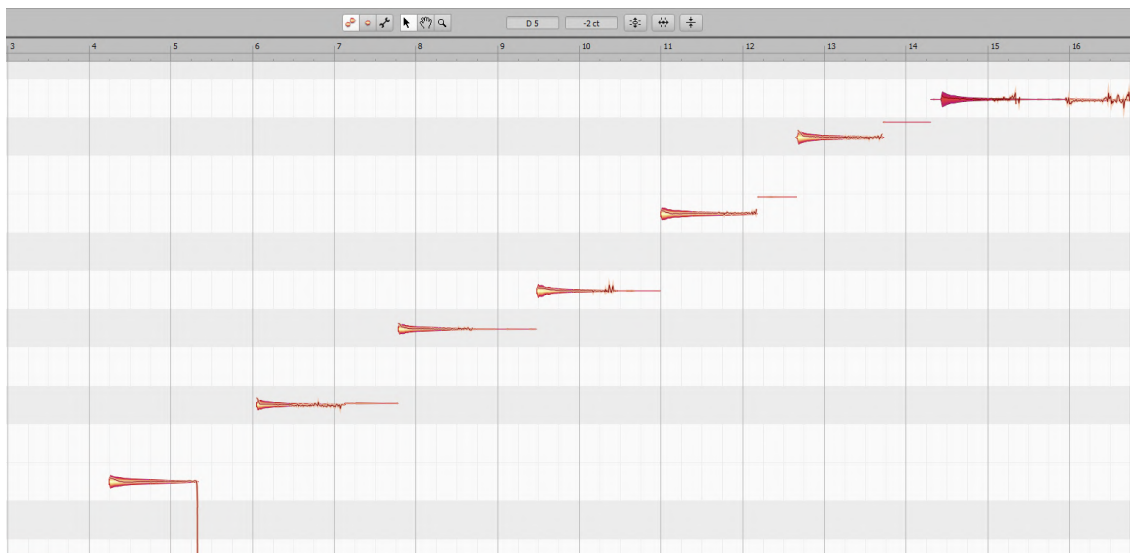
2.1.6 Testování

Pro otestování možností a funkčnosti systému posuvných pražců byl nástroj opražcován podle rozměrů z pražcové kalkulačky pro několik tónů na prostřední d struně. Následně byl za pomoci ladičky změřen tón na pražci, který byl přesně v polovině menzury, tedy oktáva, a na základě toho upravena intonace změnou polohy kobylky.



Obr. 2.8: Nastavení pražců – rovnoměrný temperament, lydická stupnice

Poté byl pomocí mikrofonu a zvukové karty nahrán zvuk jednotlivých tónů včetně prázdné struny na počítač do programu Reaper. Zde bylo možné pomocí VST pluginu Celemony Melodyne Elements 5 zobrazit tóny v grafickém rozhraní, které představuje klaviaturu (bílé a černé klávesy). Po klepnutí na konkrétní tón se na horním panelu pluginu zobrazí hodnota rozladění v centech.



Obr. 2.9: Analýza výšky tónu v softwaru Celemony Melodyne 5 Elements

Největší naměřená odchylka byla -2 centy. Vzhledem k tomu, že prázdná struna neodpovídala úplně přesně tónu d_1 (+1 cent), je velikost výsledné odchylky 3 centy, což je ale pořád uchem těžko postřehnutelný rozdíl. Struny byly při nahrávání vždy

stisknuty těsně před pražcem a velice jemně. Při běžném hraní může jistě docházet k větším odchylkám. Konkrétní tóny a jejich odchylky jsou zobrazeny v tabulce 2.1.

Tón	d_1	e_1	fis_1	gis_1	a_1	h_1	cis_2	d_2
odchylka [c]	+1	+1	+1	-1	-2	-1	-1	-2

Tab. 2.1: Odchylky při měření přesnosti pražců

Dále byl nástroj opražcován do středotónového ladění, z důvodu malého množství posuvných kamenů s pražci pouze pro strunu d_1 . Rozložení pražců na hmatníku můžeme vidět na obrázku 2.10, pražce byly nastaveny podle tabulky 2.5. Vzhledem k tomu, že základní tón, od kterého je stupnice vystavěna, je c , musíme prázdnou strunu naladit podle spočítané odchylky v tabulce 2.2, takže v tomto případě musíme strunu naladit o sedm centů níže.



Obr. 2.10: Nastavení pražců – středotónové ladění

Stejným způsobem jako v předchozí části byly potom změřeny odchylky od rovnoměrně temperovaného ladění, porovnány s vypočtenými hodnotami a zapsány do tabulky 2.2. V tomto případě jsou už odchylky od očekávaných hodnot o něco větší a výsledné tóny jsou převážně výše než očekávaná hodnota. Největší odchylka byla v tomto případě 6 centů.

Při přidávání pražců na hmatník se ukázalo, že drážka pod strunou a je užší než drážka pod strunou d_1 , a kameny s pražci, které byly odzkoušeny na struně a ve drážce pod strunou d_1 nedrží. Naopak kameny pro strunu d_1 byly pro drážku pod strunou a moc široké. Tento problém se podařilo později částečně eliminovat, nyní jsou všechny drážky přibližně stejně široké, bohužel ne úplně po celé délce drážek. V některých místech jdou kameny s pražci do drážky zasadit těžko, v jiných místech jsou zase příliš volné. Je možné, že po vložení většího množství kamenů s pražci se drážka nepatrně roztáhne a některé kameny potom mohou v drážce špatně držet.

Pražec č.	0	1	2	3	4	5	6
tón	d_1	dis_1	e_1	f_1	fis_1	g_1	gis_1
vypočítaná odchylka [c]	-7	+10	-14	+3	-21	-3	-27
změřená odchylka [c]	-7	+16	-10	+4	-15	0	-21
chyba [c]	0	+6	+4	+1	+6	+3	+6

Pražec č.	7	8	9	10	11	12
tón	a_1	hes_1	h_1	c_2	cis_2	d_2
vypočítaná odchylka [c]	-10	+7	-17	0	-24	-7
změřená odchylka [c]	-6	+11	-14	0	-21	-10
chyba [c]	+4	+4	+3	0	+3	-3

Tab. 2.2: Měření odchylek – středotónové ladění

Po dokončení nástroje bylo provedeno ještě jedno měření intonace, tentokrát pro čtvrttóny v *rovnoměrně temperovaném ladění*. Měření bylo provedeno podobně jako v předchozích bodech, zvuk byl nahrán pomocí snímače. Byla provedena dvě měření, jedno pro jemnou hru, struny byly vždy stisknuty lehce, druhé měření pro agresivnější hru, struny byly silně přitisknuty k hmatníku. Hodnoty z VST Melodyne byly přepočítány na rozladění od očekávané hodnoty a zapsány do tabulky 2.3.

Pražec č.	0	1	2	3	4	5	6	7	8
lehký stisk [c]	-1	+8	+5	+4	+6	+6	+5	+4	+5
silný stisk [c]	0	+11	+11	+12	+12	+11	+10	+9	+6

Pražec č.	9	10	11	12	13	14	15	16	17
lehký stisk [c]	+5	+3	+1	0	+4	+2	0	-3	+4
silný stisk [c]	+6	+6	-1	0	+5	+2	-1	-2	+7

Pražec č.	18	19	20	21	22	23	24
lehký stisk [c]	-4	0	0	+2	-2	-4	-3
silný stisk [c]	-2	-6	-3	-6	-3	-4	-6

Tab. 2.3: Měření odchylek pro čtvrttóny – rovnoměrně temperované ladění

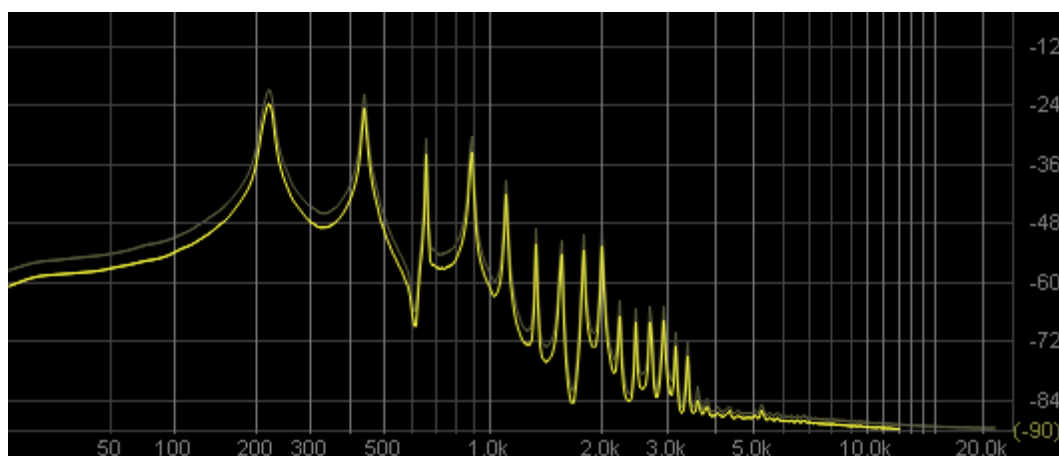
Silnější stisk se nejvíce projevuje v prvních sedmi polohách, kde jsou větší mezery mezi jednotlivými pražci a tím pádem je možné při silném stisku strunu vytáhnout, ve vyšších polohách, kde jsou pražce velice blízko u sebe, to už v podstatě možné není.

2.1.7 Zvukové vlastnosti nástroje

Nástroj *bakalajka* je snímáný pomocí elektromagnetického snímače, dále obsahuje potenciometr pro upravení hlasitosti (volume) a potenciometr tónové clony (tone).

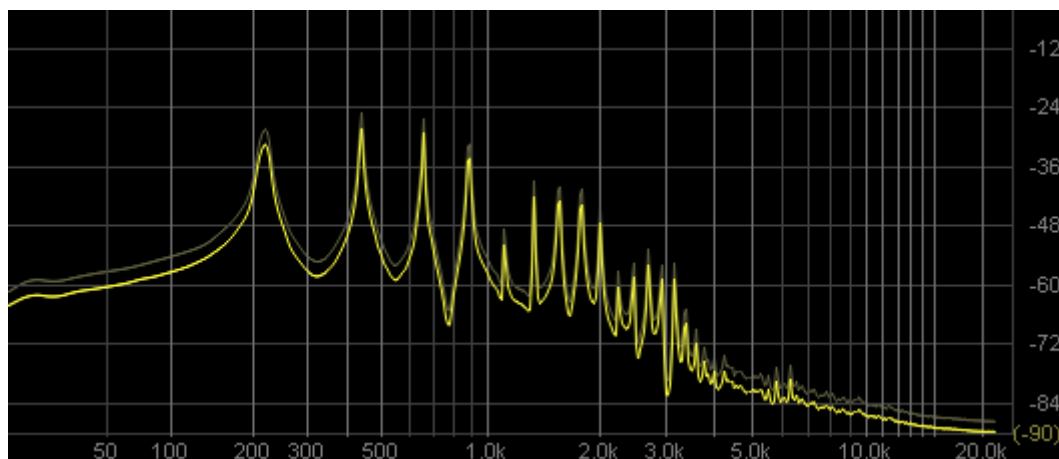
Pro vyzkoušení zvukového charakteru nástroje bylo vytvořeno několik nahrávek. V těchto nahrávkách je zachycen čistý signál z výstupu nástroje bez jakýchkoliv efektů. Nahrávky byly vytvořeny pro různé styly hry, zároveň byla vyzkoušena funkčnost tónové clony. Tři nahrávky (hra trsátkem u krku, hra trsátkem u kobyly a hra trsátkem u kobyly – tónová clona) jsou obsaženy v elektronické příloze práce. Pro první dvě jmenované byla tónová clona úplně „vypnuta“, pro poslední nahrávku (hra trsátkem u kobyly – tónová clona) byla tónová clona nastavena do druhé krajní polohy.

Z nahrávek je patrné, že poloha, ve které drnkáme, hraje velkou roli ve výsledném zvuku. Při hraní blíže krku je zvuk měkčí, kulatější, u kobyly naopak ostřejší [6]. V FFT na obr. 2.12 a obr. 2.11 můžeme porovnat zastoupení vyšších harmonických složek. Při hře u krku jsou na prázdné struně *a* výraznější první, druhá a pátá harmonická složka, při hře u kobyly je výraznější třetí harmonická složka a dále harmonické složky od šesté výše.

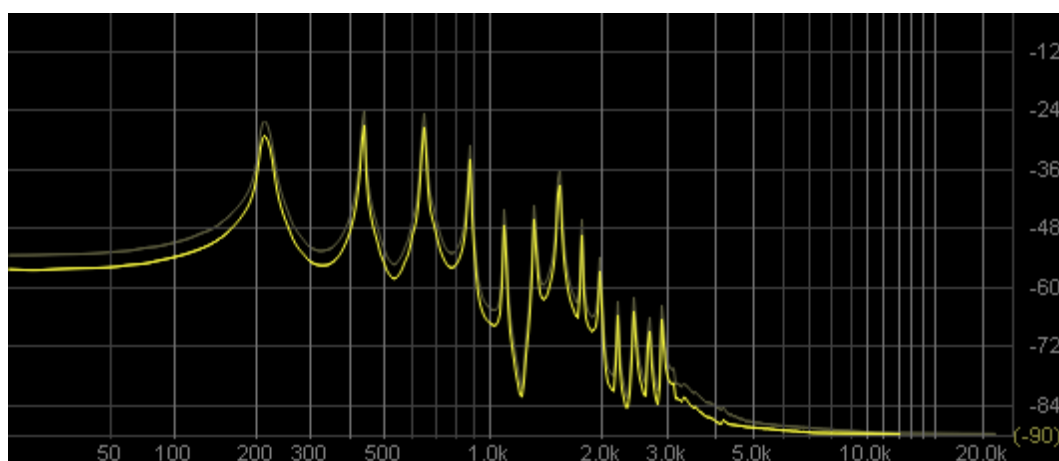


Obr. 2.11: FFT – struna *a*, hra u krku

Rozdíly ve zvuku při použití tónové clony můžeme porovnat v obr. 2.12 a obr. 2.13. Největší rozdíly jsou patrné od osmé harmonické složky, dále pokles u šesté harmonické složky. V FFT filtrovaného signálu je možné vidět větší zastoupení sedmé harmonické složky, v tomto případě jde pravděpodobně spíše o nepřesně zahrnutý tón (drobný rozdíl v místě a síle drnknutí).



Obr. 2.12: FFT – struna *a*, hra u kobylky



Obr. 2.13: FFT – struna *a*, hra u kobylky, tónová clona

Rozsah tónové clony je možné ovlivnit změnou hodnoty použitého kondenzátoru a potenciometru. Pro single-coil snímače se obvykle používají potenciometry o hodnotě 250 k Ω . Často používané kapacity kondenzátorů pro tónovou clonu bývají 22 nF a 47 nF. Vyšší hodnota znamená tmavší, kulatější zvuk, tzn. výraznější oříznutí vyšších harmonických složek. S kapacitami kondenzátorů pro tónovou clonu je možné různě experimentovat a přizpůsobit tak zvuk svým vlastním představám.

Důležitou roli hraje také typ kondenzátoru. Keramické kondenzátory jsou levnější, ale mají horší vlastnosti, především toleranci kapacity. U kvalitnějších kytar se obvykle používají fóliové kondenzátory [25].

V nástroji *bakalajka* byl pro odzkoušení použit pro tónovou clonu keramický kondenzátor s kapacitou 22 nF a tolerancí 10 %. Rozsah tónové clony se ukázal jako poměrně dostatečný, takže už nebylo třeba kondenzátor měnit.

2.1.8 Vyhodnocení konstrukce nástroje

Výsledný nástroj (bakalajka) je plně funkční, je vybaven elektromagnetickým snímačem, volume potenciometrem a potenciometrem tónové clony. Pro první oktávu je možné jej opražcovat do čtvrttónů, pro prvních několik poloh je možné osadit i jemněji, jedinou limitací je zde délka kamenů 8 mm. Rozměr 8 mm mezi dvěma pražci je už na hraně hratelnosti a výroba menších kamenů by neměla smysl, protože by sice bylo možné nástroj opražcovat jemněji, ale špatně by se na něj hrálo.

Přesnost ladění kromě samotného přesného nastavení rozměrů závisí také na způsobu hry, na výšce dohmatu a s tím spojené přesnosti výšky pražců. Při silnějším stisku strun je možné strunu kvůli mezerám v hmatníku výrazně vytáhnout a zvýšit tak výsledný tón např. i o 15 centů. Výšku dohmatu je možné ovlivnit nastavením kobylky, čím menší je vzdálenost strun od pražců, tím méně strunu vytahujeme. Nultý pražec je ale pevný, a pokud bude struna v místě nultého pražce příliš vysoko, bude v prvních polohách hra obtížnější a méně intonačně přesná vlivem vytahování strun. Tento problém se v praxi ukázal před měřením intonace čtvrttónové stupnice, kdy byla drážka v nultém pražci pro strunu g_1 málo propilovaná, strunu na prvním pražci bylo nutné stisknout opravdu silně, což negativně ovlivnilo intonaci (odchylka více než 20 centů) a bylo nutné nultý pražec opravit.

Průřez drážek pro posuvné kameny s pražci není úplně stejný po celé délce, i kameny se různě rozměrově liší. Při osazování je tedy třeba kameny zkoušet na konkrétní místo v drážce a případně vybrat jiný, který do drážky sedí lépe. Tento problém je způsoben především nepřesností technologie, drážky byly vyřezány na kotoučové pile, rozdíly mezi jednotlivými drážkami byly v řádu desetin milimetrů a bylo nutné je ručně dobrousit. Boky kamenů s pražci byly rovněž upravovány ručně, rozměr byl ověřován zasazením do drážky, což opět dává prostor pro vznik mnoha nepřesností.

Pro případnou konstrukci dalšího nástroje s tímto způsobem řešení posuvných pražců by bylo vhodné tento problém co nejvíce eliminovat např. vyfrézováním drážek na CNC frézce a zároveň přesným měřením boků kamenů při jejich výrobě.

Pokud bychom chtěli experimentovat s rozdělením oktávy na větší množství mikrotónů bylo by pravděpodobně vhodnější sestavit nástroj s delší menzurou. Dále se nabízí několik možností obměn, jak v konstrukci samotného nástroje, tak například ve snímání. Zvuk nástroje by bylo možné obohatit například zdvojením strun (zde by ale mohl být problém se zhoršenou manipulací s posuvnými kameny), snímání pomocí piezoelektrického snímače nebo místo strun pro elektrickou kytaru použít nylonové struny (samozřejmě v kombinaci s piezo snímačem).

2.2 Program pro výpočet poloh pražců

Při opražcování nástroje je vhodné mít k dispozici tabulku s rozměry polohy jednotlivých pražců. Pro rovnoměrně temperované ladění existují na internetu různé kalkulačky, které na základě zadané velikosti menzury spočítají rozměry pro zadaný počet pražců a vytvoří tabulku [4]. Obvykle jsou zde uvedeny dva rozměry pro každý pražec, konkrétně vzdálenost od nultého pražce a vzdálenost od předchozího pražce. Vzdálenosti mezi jednotlivými pražci jsou spíše jen orientační údaj, vhodné je měřit od nultého pražce, protože při měření od předchozího pražce by se nám sčítaly nepřesnosti při měření, což by mohlo vést k velkým odchylkám, a u poloh pražců hrají roli i desetiny milimetrů.

V případě, že bychom měli nástroj opražcovaný do dvanáctipůltónové stupnice a pouze bychom upravovali intonaci jednotlivých tónů do různých ladících systémů, které dělí oktávu na dvanáct půltónů, bylo by možná vhodnější použít tabulky s hodnotami v centech, které by reprezentovaly rozladění oproti rovnoměrnému temperamentu a podle ladičky upravovat polohu pražců. Nicméně pro náš případ, kdy chceme experimentovat s laděními, které mohou dělit oktávu na různý počet dílů, zdá se jako praktičtější řešení osázet hmatník pražci podle tabulky s rozměry podobně, jako bychom konstruovali nástroj s klasickými „pevnými“ pražci.

Za účelem vygenerování tabulky vzdáleností pražců pro různá ladění byl vytvořen prototyp programu pomocí Microsoft Excel. Spočítání poloh pražců není příliš matematicky složité, ale je nutné tyto výpočty provést pro každý pražec a v případě některých ladění i pro každou strunu zvlášť.

2.2.1 Vztahy pro výpočet poloh pražců

Pro výpočet vzdáleností pražců potřebujeme zjistit vztah mezi frekvencí tónu a délkou struny. Pro stojaté vlnění platí vzorec [6]:

$$\lambda \cdot f = c, \quad (2.3)$$

kde λ je vlnová délka, f značí frekvenci a c odpovídá rychlosti šíření vlny. V našem případě (frekvence fundamentu) odpovídá vlnová délka dvojnásobku menzury (viz obr. 1.2). Po upravení bychom dostali rovnici:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2 \cdot L}, \quad (2.4)$$

kde L označuje menzuru nástroje. Pokud bychom znali rychlost šíření vlny, mohli bychom takto spočítat frekvenci prázdné struny. V našem případě však předpokládáme, že rychlost šíření vlny bude pro celou délku struny stejná a hledáme pouze vztah mezi frekvencí a délkou struny. Pro frekvenci tónu na prvním pražci označenou jako f_1 , která bude určena poměrem k_1 z frekvence prázdné struny f bude platit vztah:

$$f_1 = f \cdot k_1 = \frac{c}{2 \cdot L_1}, \quad (2.5)$$

kde L_1 je délka kmitající struny. Po úpravě dostaneme:

$$f = \frac{c}{2 \cdot k_1 \cdot L_1}. \quad (2.6)$$

Nyní můžeme porovnat oba vztahy pro frekvenci tónu prázdné struny:

$$\frac{c}{2 \cdot L} = \frac{c}{2 \cdot k_1 \cdot L_1} \quad (2.7)$$

$$L = k_1 \cdot L_1. \quad (2.8)$$

Pro délku zkrácené struny potom platí:

$$L_1 = \frac{L}{k_1}, \quad (2.9)$$

v tomto případě jde však o část struny, která kmitá. Pro získání délky L_{1p} , kterou budeme odměřovat od nultého pražce stačí odečíst délku L_1 od menzury L :

$$L_{1p} = L - \frac{L}{k_1}, \quad (2.10)$$

pro polohu n -tého pražce L_{np} by vzorec 2.10 v obecném tvaru vypadal následovně:

$$L_{np} = L - \frac{L}{k_n}, \quad (2.11)$$

kde k_n odpovídá poměru pro n -tý pražec. Jde o poměr frekvence požadovaného tónu ku frekvenci základního tónu. Tyto tabulky je možné dohledat např. na Wikipedii v článcích o jednotlivých ladících systémech, nebo v programu Scala [26]. Dále například VSTi plugin Pianoteq také umožňuje zobrazit poměry k jednotlivým tónům chromatické stupnice pro různé ladící systémy [27].

Nyní můžeme pomocí tohoto vztahu provést výpočet pro více pražců a ověřit si tento vztah například na rovnoměrně temperovaném ladění. V tomto případě koeficient k_n odpovídá výrazu $\left(\sqrt[12]{2}\right)^n$, kde n je počet půltónů od nultého pražce (číslo pražce). Rovnici můžeme upravit následujícím způsobem:

$$L_{np} = L - \frac{L}{\left(\sqrt[12]{2}\right)^n}, \quad (2.12)$$

kde L_{np} odpovídá vzdálenosti n -tého pražce od nultého pražce. Rozměry mezi pražci potom můžeme dopočítat tak, že od vzdálenosti pražce k nultému pražci odečteme vzdálenost od předchozího pražce k nultému pražci. Po přepsání vzorce do Excelu a spočítání pro prvních 12 pražců můžeme vidět výsledky těchto rozměrů v tabulce 2.4.

Pražec č.	1	2	3	4	5	6
k nultému pražci [mm]	31,99	62,19	90,69	117,59	142,98	166,95
k předchoz. pražci [mm]	31,99	30,2	28,5	26,9	25,39	23,97

Pražec č.	7	8	9	10	11	12
k nultému pražci [mm]	189,57	210,92	231,08	250,1	268,05	285
k předchoz. pražci [mm]	22,62	21,35	20,15	19,02	17,95	16,95

Tab. 2.4: Vzdálenosti pražců v rovnoměrném temperamentu, $L = 570$ mm

Výsledné hodnoty si můžeme ověřit pomocí některé z internetových pražcových kalkulaček.

Podobným způsobem bychom mohli spočítat například *středotónové ladění*. Kdybychom, ale jen dosadili do vzorce 2.12 za k_n poměry z tabulky, výsledné poměry by odpovídaly pouze pokud by prázdná struna byla naladěná na tón c . Proto musíme vzít v úvahu i ladění nástroje a spočítat vzdálenosti pražců pro každou strunu zvlášť. V tomto případě se zdá být nejlepším řešením spočítání poměrů mezi jednotlivými půltóny a pro výpočet polohy každého dalšího pražce použijeme polohu předchozího pražce. Například poměr k_{e-f} mezi tóny e a f bychom spočítali takto:

$$k_{e-f} = \frac{k_f}{k_e}, \quad (2.13)$$

kde k_e je poměr pro tón e a k_f poměr pro tón f . Pro vzdálenost n -tého pražce L_{np} od nultého pražce platí:

$$L_{np} = L - L_{(n-1)p} - \frac{L - L_{(n-1)p}}{k_x} + L_{(n-1)p}, \quad (2.14)$$

kde L je menzura nástroje, $L_{(n-1)p}$ je vzdálenost předchozího pražce od nultého pražce a k_x je poměr mezi tóny na n -tém pražci a předchozím pražci ($n-1$). Výsledné vzdálenosti pražců od nultého pražce pro prvních 12 pražců na každé struně můžeme vidět v tabulce 2.5.

Rozměry mezi dvěma sousedními pražci L'_{np} je možné vypočítat odečtením vzdálenosti předchozího pražce $L_{(n-1)p}$ od vzdálenosti pražce L_{np} :

$$L'_{np} = L_{np} - L_{(n-1)p}. \quad (2.15)$$

	a	d_1	g_1
pražec č.	[mm]	[mm]	[mm]
1	37,28	37,28	24,5
2	60,18	60,18	60,18
3	93,52	93,52	93,52
4	114	114	114
5	143,83	143,83	143,83
6	171,7	162,14	162,14
7	188,82	188,82	188,82
8	213,75	213,75	213,75
9	229,06	229,06	229,06
10	251,36	251,36	251,36
11	265,05	265,05	265,05
12	285	285	285

Tab. 2.5: Vzdálenosti od nultého pražce – středotónové ladění, $L = 570$ mm

2.2.2 Řešení programu pražcové kalkulačky

Pražcová kalkulačka byla původně zamýšlena jako standalone aplikace, ale nakonec se jako pravděpodobně jednodušší a elegantnější řešení ukázala webová aplikace s použitím jazyků HTML, CSS a JavaScript. Aplikace tak poběží přímo ve webovém prohlížeči a tím pádem teoreticky na jakémkoli zařízení bez problémů s kompatibilitou. Program použitý pro tuto práci díky tomu může také v budoucnu posloužit jako základ pro webovou stránku.

Princip funkce kalkulačky byl inspirován internetovými pražcovými kalkulačkami pro rovnoměrně temperované ladění. Takových kalkulaček je možné najít na internetu hned několik, ale žádná z nich neumožňuje vygenerování celé tabulky s polohami pražců pro jiné než rovnoměrně temperované ladění. V případě internetové kalkulačky na webu *liutaiozottola.com* je možné vypočíst rozměry např. pro čtvrttóny, ale pouze pro každý pražec zvlášť [28].

Výsledná pražcová kalkulačka je tedy řešená podobně jako pražcová kalkulačka na webu *stewmac.com* [4], kde uživatel zadá počet pražců, délku menzury a po potvrzení se vygeneruje tabulka s rozměry pro daný počet pražců. Ve finální podobě pražcové kalkulačky je možné použít několik přednastavených ladění pro nástroj *bakalajka*, jehož konstrukcí se tato práce zabývá, a pro kytaru. Dále jsou k dispozici tři režimy pro konstrukci dalších ladění, a to na základě poměrů od základního tónu, velikosti stejných dílů v centech nebo počtů rovnoměrných dílů na oktávu (rovnoměrně temperované ladění).

Hlavním souborem programu je *index.html*, který slouží jako hlavní menu kalkulačky. Zde je možno vybrat jeden z módů kalkulačky, např. presety pro nástroj *bakalajka* nebo presety pro kytaru. Soubor *style.css* slouží pro nastavení rozvržení stránky, barev, písma a dalších vizuálních prvků. V souboru *script.js* jsou obsaženy veškeré funkce pro výpočet oprážcování a vypsání tabulky.

Funkce v JavaScriptu

V následující části kódu můžeme vidět funkci pro výpočet poloh pražců v rovnoměrně temperovaném ladění. Parametr *sacale* je menzura nástroje, *NumFrets* odpovídá počtu pražců, které chceme vypsát a parametr *num* je počet rovnoměrných dílů na oktávu. Protože je tato funkce použita pro několik různých presetů (např. čtvrttóny, šestinotóny, atd.), je zde ještě parametr *popis*, který slouží pro vypsání jména ladění nad tabulku.

Funkce je tedy schopna vypsát tabulku pro zadanou menzuru, počet pražců a dílů na oktávu. Kvůli vypsání pouze zadaného počtu řádků tabulky musí být veškeré HTML příkazy pro zobrazení tabulky obsažené přímo v této funkci. Na začátku

funkce je definovaná proměnná `table`, do které je uložen HTML kód, který vypíše informace o ladění a menzuře, a poté hlavičku tabulky.

```
function rovtemp(scale, NumFrets, num, popis){
    var z = 1;
    var red;
    var table = ("<div class='show-temperament'>
Rovnoměrně temperované ladění" + popis + "</div>
<div class='show-scale'>menzura = " + scale + " mm </div>");
    table += '<table>';

    // první řada
    table += '<th> Číslo pražce </th>
<th> Vzdálenost od nultého pražce </th>
<th> Vzdálenost od předchozího pražce</th>';

    // dynamická část tabulky
    for(var i=0; i < NumFrets; i++){
        var a = scale - scale / Math.pow(Math.pow(2,i+1),1/num);
        var b = a - (scale - scale / Math.pow(Math.pow(2,i),1/num));

        // vyznačení oktáv
        if ((i+1)/z == num){
            red = 'class="red"';
            z++;
        }
        else red = '';

        // uložení hodnot
        table += '<tr ' + red + '>';
        table += '<td align="center">' + (i+1) + '</td>';
        table += '<td>' + Math.round(a * 1000)/1000 + " mm" + '</td>';
        table += '<td>' + Math.round(b * 1000)/1000 + " mm" + '</td>';
        table += '</tr>';
    }
    table += '</table>';
    document.getElementById("tab").innerHTML = table;
}
```

Dynamická část tabulky obsahuje cyklus, který vypočítá postupně rozměry pro každý pražec (viz vzorce 2.12 a 2.15) a uloží tyto údaje spolu s HTML kódem jako další prvky do proměnné `table`. Funkce `Math.round` slouží pro zaokrouhlení na celá čísla. V tomto případě chceme zaokrouhlit na tisíce, proto jsou rozměry nejprve vynásobeny tisícem, zaokrouhleny na celá čísla, a následně vyděleny tisícem. Po dosažení zadaného počtu pražců se cyklus ukončí, do proměnné `table` se přidá tag pro ukončení tabulky a výsledný řetězec je následně uložen na příslušné místo v HTML dokumentu.

Část kódu s poznámkou „vyznačení oktáv“ vyhodnotí, zda aktuální řádek v tabulce odpovídá oktávě od základního tónu. Proměnná `z` má na začátku hodnotu 1, to znamená, že se pohybujeme v první oktávě. V případě, že je podmínka splněna, zapíše se do proměnné `red` hodnota `class="red"` a inkrementuje se hodnota proměnné `z`. Pokud podmínka splněna není, zapíše se pouze prázdný řetězec. Hodnota `class="red"` slouží pro identifikaci v CSS, kde je pro tuto třídu nastavena barva pozadí na červenou.

Tato funkce je ve výsledném programu využita jak pro výpočet *rovnoměrně temperovaného ladění* v presetech, tak pro režim výpočtu *rovnoměrně temperovaného ladění* z počtu dílů na oktávu. Funkce `rovtempCenty`, sloužící pro výpočet ladění o stejných dílech zadaných v centech, je pouze upravenou verzí této funkce (podle vzorce 1.6), má místo počtu dílů na oktávu vstupní parametr velikosti kroku v centech, který je ve funkci opět přepočten na počet dílů na oktávu.

Funkce pro výpočet opražcování s fixními poměry `PomerSysFix` (např. pro nástroj bağlama) má podobnou strukturu. Poměry od základního tónu zde však nejsou dány matematickou funkcí, ale vstupním parametrem `inputArray`, což je posloupnost poměrů od základního tónu (v tomto případě prázdné struny).

Vyznačení oktáv je zde řešeno pomocí parametru `styl`, do kterého je zapsána příslušná hodnota třídy, u které je v CSS přiřazena červená barva pozadí pro každý n -tý řádek v tabulce.

Tato funkce je ve výsledném programu využita pouze pro dvě ladění nástroje bağlama (saz). Poměry pro tento nástroj v případě klasického ladění vycházejí z *pythagorejského ladění* a jsou pro všechny struny stejné, protože u této konstrukce pražců to jinak ani není možné.

```

function PomerSysFix(scale, NumFrets, inputArray, popis, styl){

    var table =("<div class='show-temperament'>" + popis + "</div>
    <div class='show-scale'>menzura = " + scale + " mm </div>");
    table += '<table class='+styl+'>';

    // první řada
    table += '<th> Číslo pražce </th>
    <th> Vzdálenost od nultého pražce </th>
    <th> Vzdálenost od předchozího pražce</th>';

    // dynamická část tabulky
    var c = 1;
    var d;
    for(var i=0; i < NumFrets; i++){
        if(i === (c*(inputArray.length-1)) ){
            ++c;
        }
        d = i - ((c-1)*(inputArray.length-1));
        var a = scale - scale / (c*inputArray[d+1]);
        var b = 0;
        b = a - (scale - scale / (c*inputArray[d]));

        // uložení hodnot
        table += '<tr>';
        table += '<td align="center">' + (i+1) + ' </td>';
        table += '<td>' + Math.round(a * 1000)/1000 + " mm" + ' </td>';
        table += '<td>' + Math.round(b * 1000)/1000 + " mm" + ' </td>';
        table += '</tr>';
    }
    table += '</table>';
    document.getElementById("tab").innerHTML = table;
}

```

Řetězce poměrů od základního tónu jsou zapsány v souboru *script.js*, zde můžeme vidět příklad zapsaných poměrů pro *pythagorejské ladění*:

```
let pythZ = [1, //c
256/243,      //des
9/8,          //d
32/27,        //es
81/64,        //e
4/3,          //f
729/512,      //fis
3/2,          //g
128/81,       //as
27/16,        //a
16/9,         //b
243/128,      //h
2];           //c1,
```

kde prvním číslem je vždy 1, tedy poměr od základního tónu k základnímu tónu, dále jsou poměry seřazeny tak, jak jdou tóny po sobě ve stupnici (v tomto případě chromatické).

Pro správné opožcování právě například u *pythagorejského ladění*, *didymického ladění* nebo jakéhokoliv *nerovnoměrně temperovaného ladění* je třeba vypočítat vzdálenosti pražců pro každou strunu zvlášť, protože u každé struny začínáme stupnici od jiného tónu a jednotlivé poměry mezi dvěma tóny zde nejsou vždy stejné.

Proto je třeba přepočítat poměry od základního tónu na poměry mezi jednotlivými půltóny. Pro tento účel byla v programu použita funkce *PomeryMezi*. Vstupním parametrem této funkce je posloupnost poměrů od základního tónu, výstupní hodnotou funkce je posloupnost poměrů mezi jednotlivými tóny.

```
function PomeryMezi(pomeryOdFundamentu){
  let pythPom = [1, ''];

  for(let i = 0; i<12; i++){
    pythPom[i+1] = pomeryOdFundamentu[i+1]/pomeryOdFundamentu[i];
  }
  for(let i = 0; i<12; i++){
    pythPom[i+13] = pomeryOdFundamentu[i+1]/pomeryOdFundamentu[i];
  }
  return pythPom;
}
```

Prvním číslem výsledné posloupnosti je 1 dále pak poměry mezi tóny *c* a *cis*, *d* a *dis* a tak dále. Kvůli posunutím ve funkci pro výpočet vzdáleností pražců pro každou strunu zvlášť je tato posloupnost poměrů ve výsledném řetězci dvakrát po sobě.

K vygenerování tabulky pro tato ladění slouží funkce `pomerSysDva` pro *bakalajku* a `pomerSysDvaGtr` pro kytaru. Vstupní parametry těchto funkcí jsou opět menzura, počet pražců, dále posloupnost poměrů mezi tóny a popis ladění, který se zobrazí nad tabulkou. Struktura funkce je podobná jako u předešlých funkcí na vygenerování tabulky, liší se hlavně dynamickou částí a tím, že je zde celá tabulka v případě *bakalajky* třikrát a v případě kytary šestkrát. Dynamická část tabulky pro strunu *a* vypadá následovně:

```
var a = 0;
var b = 0;
var c = 1;
var j;
var h;
for(var i = 0; i < NumFrets; i++){
    if(i < 12){
        j = i + 9;  // posunutí na tón a
        h = 1; }
    if(i >= 12){
        if(i === (h*12)){
            j = j - 11;
            h++; }
        else if(i != (h*12)){
            j++; }
    }
    c = c * pomery[j+1]
    a = scale - scale / c;
    b = a - (scale - scale / (c / pomery[j+1]));
    // uložení hodnot
    table += '<tr>';
    table += '<td align="center">' + (i+1) + '</td>';
    table += '<td>' + Math.round(a * 1000)/1000 + " mm" + '</td>';
    table += '<td>' + Math.round(b * 1000)/1000 + " mm" + '</td>';
    table += '</tr>';
}
table += '</table>';
```

Jde opět o cyklus, který vypočítá rozměry pro každý pražec zvlášť. S každým opakováním se zvyšuje hodnota proměnné `i` a tím pádem i proměnné `j`, která slouží jako ukazatel na hodnoty řetězce `pomery[]`. Podmínky `if` a `else if` v cyklu slouží pro posunutí hodnoty `j`, abychom se ukazatelem nedostali do hodnot, kde řetězec `pomery` není definován. Pomocí proměnné `c` se vždy vypočítá poměr od základního tónu (prázdné struny), pomocí kterého se vypočítají rozměry pro opožďování (viz vzorce 2.11 a 2.15).

Pro další struny vypadá dynamická část tabulky stejně, pouze posunutí u proměnné `j` je změněno tak, aby v případě, že `i = 0`, hodnota `pomery[j+1]` odpovídala poměru mezi tónem prázdné struny a následujícím tónem v chromatické stupnici.

Struktura HTML souborů a provázání s JavaScriptem

Zatímco v JavaScriptu máme definované různé funkce, HTML se spolu s CSS stará o zobrazení grafického rozhraní a načtení parametrů od uživatele. Například pro načtení počtu pražců od uživatele byl použit následující kód v HTML [29] [30]:

```
<input class="input" type="number" id="pocet"
onKeyPress="if(this.value.length==2) return false;"/>.
```

Při spuštění v prohlížeči se zobrazí okénko pro zapsání čísla, hodnota `onKeyPress` omezuje délku vstupu na dva znaky a `type="number"` omezuje vstup pouze na čísla. Důležitý je parametr `id="pocet"`, který slouží jako identifikátor a využívá jej následující funkce v JS, která načte hodnotu z tohoto vstupu.

```
function getValB(){
    NumFrets = document.getElementById("pocet").value;
}
```

Pro spuštění této funkce slouží následující část HTML kódu, která představuje tlačítko. Po jeho stisknutí je spuštěna funkce `getValB`, která uloží zadaný počet pražců do proměnné `NumFrets`.

```
<button class="btn" id="btn-submit"
onclick="getValB(), chooseTemp(); return false;">Změnit</button>
```

Dále je spuštěna funkce `chooseTemp`, která se stará o výběr ladícího systému. Zde můžeme vidět zápis v JavaScriptu pro první dva ladící systémy. Pro další ladící systémy je zápis podobný, pokud hodnota `id="temperament"` odpovídá hodnotě pro konkrétní ladění, podmínka je splněna a spustí se příslušná funkce se zadanými parametry.

```
function chooseTemp(){
    if(document.getElementById("temperament").value === "ETST"){
        rovtemp(scale, NumFrets, 12, "");
    }
    else if(document.getElementById("temperament").value === "ETQT"){
        rovtemp(scale, NumFrets, 24, " - čtvrttóny");
    }
    :
}
}
```

Tímto způsobem jsou vypsány podmínky pro všechny ladící systémy obsažené v pre-setech pro *bakalajku* a kytaru. Výběr ladícího systému je v HTML souboru řešen takto:

```
<select id="temperament" name="temperament">
    <optgroup label="Rovnoměrně temperované ladění">
        <option value="ETST">Rovnoměrně temperované - půltóny</option>
        <option value="ETQT">Rovnoměrně temperované - čtvrttóny</option>
        :
    </optgroup>
    :
</select>.
```

Pro každou možnost je definována hodnota `value`, která slouží v JavaScriptu k identifikaci ladícího systému. Jednotlivé možnosti `<option>` jsou kvůli přehlednosti rozděleny do skupin `<optgroup>` [30].

Využití kaskádových stylů (CSS)

Formátování HTML dokumentů, tedy především úpravu barev, písma a rozvržení stránky, je běžně řešeno pomocí kaskádových stylů (CSS – *Cascading Style Sheets*). Díky nim je možné definovat formátování například pro konkrétní HTML tag, pro určitou třídu (`class`) nebo identifikátor (`id`). Některé tagy obsahují pseudo třídy, např. `a: hover`, jde o odkaz ve stavu, kdy je na něj najeto myší. V případě výsledného programu je pro tuto pseudo třídu definovaná modrá barva pozadí.

Nejlepší přístup z hlediska přehlednosti a možnosti použití stejného nastavení pro několik HTML dokumentech je použít externí soubor kaskádových stylů. V našem případě jde o soubor *style.css*, který je naimportován v hlavičce každého HTML souboru [31] [32].

V následující části kódu je definována třída `centerBlock`, která zahrnuje všechny popisy, tlačítka, a pole pro vstup hodnot od uživatele. Kolem celého tohoto bloku je nastaveno černé ohrazení o tloušťce 2 pixely. Dále jsou zde určeny minimální šířka bloku, maximální šířka bloku a preferované řezy písma (Arial, Helvetica, sans-serif).

Limitace šířky tohoto bloku zde byla definována především kvůli čitelnosti tabulky – při vyšších rozlišeních byly sloupce tabulky příliš daleko od sebe, naopak při nižších rozlišeních než 320 pixelů už docházelo především k nevhodnému zalamování textu. V rámci tohoto rozmezí se tento blok přizpůsobí šířce okna prohlížeče, což umožňuje čitelné zobrazení i na mobilních telefonech.

```
.centerBlock{
  border: solid black 2px;
  width: 100%;
  max-width: 800px;
  min-width: 320px;
  margin-left: auto;
  margin-right: auto;
  font-family: Arial, Helvetica, sans-serif;
}
```

Pro lepší vizuální oddělení řádků tabulky má každý lichý řádek (počítáno od hlavičky tabulky) šedou barvu pozadí. Vyznačení je řešeno pomocí funkce `nth-child` s parametrem `odd` (lichý).

```
tr:nth-child(odd) {background-color: #e9e9e9;}
```

Následující část kódu zajišťuje vykreslení poloh oktáv od prázdné struny červenou barvou. Pro nástroj *baglama* a pro ladění která dělí oktávu na 12 půltónů je veškerý kód řešen přímo v CSS opět pomocí definic pro *n*-tý řádek tabulky. V případě *rovnoměrně temperovaného ladění* je označení oktáv zakomponováno přímo ve funkcích v JavaScriptu, kde je třída `red` přiřazena přímo pro konkrétní řádek tabulky. V CSS je potom pouze k třídě `red` přiřazena červená barva pozadí.

```
.twelve tr:nth-child(12n+1) {background-color: rgb(255, 100, 100);}
.baglama tr:nth-child(17n+1) {background-color: rgb(255, 100, 100);}
tr.red {background-color: rgb(255, 100, 100);}
```

2.2.3 Režimy kalkulačky

Pražcová kalkulačka obsahuje pět režimů pro výpočet rozměrů pro opražcování. Po spuštění hlavního souboru *index.html*, se zobrazí hlavní menu (viz obr. 2.14), kde je možné vybrat jeden z režimů. Díky těmto režimům je možné vypočítat rozměry pro existující přednastavená ladění nebo vytvořit vlastní ladění.

První dva režimy umožňují vygenerování tabulky s rozměry poloh pražců v několika vybraných ladících systémech. Je zde obsaženo *rovnoměrně temperované ladění* (půltóny, čtvrttóny, třetinotóny a šestinotóny), *pythagorejské*, *didymické*, *středotonové ladění*, několik *nerovnoměrně temperovaných* ladění a opražcování podle vzoru tureckého nástroje bağlama (saz). Režimy presetů pro *bakalajku* a kytaru obsahují stejná přednastavená ladění, liší se pouze přizpůsobením pro daný nástroj. To znamená vypsání tabulek u některých ladění pro každou strunu zvlášť.

Režim *výpočet z centů* umožňuje vytvoření stupnice o stejných dílech (zadaných v centech), režim *počet dílů na oktávu* umožňuje vygenerování rozměrů pro rovnoměrně temperované ladění s nastavitelným počtem dílů na oktávu.

Pražcová kalkulačka	
Bakalajka - presety	Presety různých ladění pro nástroj bakalajka. Vygeneruje tabulku s rozměry pro zadaný počet pražců.
Kytara - presety	Presety různých ladění pro kytaru. Vygeneruje tabulku s rozměry pro zadaný počet pražců a zvolenou menzuru.
Výpočet z poměrů	Výpočet opražcování ze zadaných poměrů od základního tónu.
Výpočet z centů	Výpočet opražcování pro rovnoměrně temperované ladění se vstupním parametrem velikosti jednoho kroku v centech. Např. půltóny: 100 centů, čtvrttóny: 50 centů atd.
Počet dílů na oktávu	Výpočet opražcování pro rovnoměrně temperované ladění se vstupním parametrem počtu dílů na oktávu.

Obr. 2.14: Pražcová kalkulačka: Hlavní menu

Bakalajka – presety

Tento režim slouží pro vygenerování tabulek pro opražcování nástroje *bakalajka* do několika různých přednastavených ladění. Pro vypočítání rozměrů stačí zadat počet pražců, vybrat některý z ladících systémů a kliknout na tlačítko „změnit“. Tlačítko „Zpět“ slouží jako odkaz do hlavního menu.

Pro některá ladění je třeba zobrazit rozměry pro každou strunu zvlášť, což je v programu řešeno tak, že se vypíše tři tabulky pod sebou, každá pro jednu strunu. Řádky tabulky pro tóny vzdálené od prázdné struny o oktávu (případně více oktáv) jsou zde vyznačeny červeně.

Na obr. 2.15 můžeme vidět vygenerovanou tabulku pro prvních 12 pražců v *rovnoměrně temperovaném ladění*.

Pražcová kalkulačka - Bakalajka		
Zpět		
Počet pražců		
12		
Ladění		
Rovnoměrně temperované - půltóny		
Změnit		
Rovnoměrně temperované ladění		
menzura = 570 mm		
Číslo pražce	Vzdálenost od nultého pražce	Vzdálenost od předchozího pražce
1	31.992 mm	31.992 mm
2	62.188 mm	30.196 mm
3	90.689 mm	28.501 mm
4	117.591 mm	26.902 mm
5	142.982 mm	25.392 mm
6	166.949 mm	23.967 mm
7	189.571 mm	22.622 mm
8	210.923 mm	21.352 mm
9	231.076 mm	20.153 mm
10	250.098 mm	19.022 mm
11	268.053 mm	17.955 mm
12	285 mm	16.947 mm

Obr. 2.15: Pražcová kalkulačka: Presety – bakalajka

Kytara – presety

Presety pro kytaru jsou řešeny stejným způsobem a obsahují stejná ladění jako v režimu pro *bakalajku*, výpočet poloh pražců je přizpůsoben pro kytaru a je zde navíc možnost nastavit délku menzury (v milimetrech). Tato funkce by mohla být užitečná pro kytaristy, kteří by chtěli např. přidat na hmatník kytary mikrotóny, popřípadě zkonstruovat nástroj v jiném ladícím systému než v *rovnoměrném temperamentu*.

Na obrázku 2.16 můžeme vidět seznam pro volbu ladícího systému. Jednotlivá ladění jsou uspořádána do skupin (druhů ladění). Jsou zde na výběr rovnoměrně temperovaná ladění – půltóny, čtvrttóny, třetinotóny a šestinotóny. Dále didymické, středotónové ladění a několik druhů nerovnoměrně temperovaných ladění. Možnost *Kirnberger I. – racionální čísla* je jakousi aproximací ladění *Kirnberger I.* pomocí racionálních čísel.

V poslední skupině ladění jsou obsaženy dvě varianty ladění pro turecký nástroj bağlama (saz). Tato ladění obsahují několik mikrotonálních intervalů. První z těchto ladění (klasické) je založeno na *pythagorejském ladění*, druhé na *rovnoměrně temperovaném ladění*.

Pražcová kalkulačka - kytara

Zpět

Menzura [mm] 648 **Počet pražců** 12

Ladění

Rovnoměrně temperované - čtvrttóny **Změnit**

Rovnoměrně temperované ladění

- Rovnoměrně temperované - půltóny
- Rovnoměrně temperované - čtvrttóny
- Rovnoměrně temperované - třetinotóny
- Rovnoměrně temperované - šestinotóny

Pythagorejské ladění

- Pythagorejské ladění

Přirozené ladění

- Didymické (přirozené) ladění

Středotónové ladění

- Středotónové ladění 1/4 komma

Nerovnoměrně temperovaná ladění

- Werckmeister III.
- Werckmeister IV.
- Werckmeister V.
- Werckmeister VI.
- Kirnberger I.
- Kirnberger I. (racionální čísla)
- Kirnberger II.
- Kirnberger III.

předchozího pražce

.447 mm
.922 mm
.412 mm
.916 mm
.435 mm
.967 mm

7 118.611 mm 15.512 mm

Obr. 2.16: Pražcová kalkulačka: Presety – volba ladícího systému

Výpočet z poměrů

Tato funkce slouží pro výpočet rozměrů ze zadaných poměrů od základního tónu. Tabulky s těmito poměry je možné najít na internetu na různých stránkách, které se zabývají hudebními ladícími systémy nebo např. na Wikipedii v článcích o konkrétních ladících systémech. Jde o poměr mezi frekvencí daného tónu a základního tónu (obvykle C). V grafickém rozhraní jsou kromě menzury a počtu pražců ještě pole pro zapsání těchto poměrů pro každý tón chromatické stupnice.

První poměr (tón C), by měl vždy odpovídat číslu 1 (respektive 1/1). Je možné zadat poměry buď ve tvaru zlomku (např. 3/2) nebo desetinného čísla (např. 1,5 nebo 1.5). Dále je třeba nastavit tón prázdné struny aby výsledné polohy pražců skutečně odpovídaly daným tónům.

Pražcová kalkulačka - výpočet z poměrů

Zpět

Menzura [mm]

648

Počet pražců

12

C

1

C#/Db

1,04490672653

D

1,1180339875

D#/Eb

1,19627902498

E

5/4

F

1,33748060995

F#/Gb

1,39754248594

G

1,49534878122

G#/Ab

25/16

A

1,67185076244

A#/B

1,78854382

H

1,86918597653

Základní tón (prázdá struna)

C

Změnit

Obr. 2.17: Pražcová kalkulačka: Výpočet z poměrů

52

Výpočet z centů

Tento režim umožňuje vytvoření stupnice složené ze stejně velkých kroků zadaných v centech. Můžeme tak například vystavět i stupnici, která nebude mít čistou oktávu. Zároveň pokud zvolíme číslo v centech, kterým lze beze zbytku vydělit číslo 1200 (počet centů v jedné oktávě), dostaneme rovnoměrně temperované ladění (např. 100 centů = půltóny, 50 centů = čtvrttóny, atd.).

Můžeme takto provádět různé experimenty s velikostí intervalů a vytvořit tak stupnice, které by nebylo možné vytvořit pomocí funkce výpočtu z počtů dílů na oktávu, protože by tato hodnota vycházela v desetinných číslech. Zároveň může být v některých případech pohodlnější použít tuto funkci, než přepočítávat velikost kroků na počet dílů na oktávu.

Pražcová kalkulačka - výpočet z centů		
Zpět		
Menzura [mm]	Počet pražců	Velikost kroku [c]
570	10	120
Změnit		
Rovnoměrně temperované ladění: 120 centů na jeden pražec		
menzura = 570 mm		
Číslo pražce	Vzdálenost od nultého pražce	Vzdálenost od předchozího pražce
1	38.171 mm	38.171 mm
2	73.786 mm	35.615 mm
3	107.016 mm	33.23 mm
4	138.021 mm	31.005 mm
5	166.949 mm	28.928 mm
6	193.94 mm	26.991 mm
7	219.124 mm	25.184 mm
8	242.621 mm	23.497 mm
9	264.545 mm	21.924 mm
10	285 mm	20.455 mm

Obr. 2.18: Pražcová kalkulačka: Výpočet z centů

Počet dílů na oktávu

Tato funkce umožňuje výpočet rovnoměrně temperovaného ladění o libovolném počtu dílů na oktávu (pouze s omezením na celá čísla). Dále je zde opět možné zvolit délku menzury a počet pražců. Pomocí této funkce můžeme vygenerovat např. rozdělení na půltóny (12 dílů), čtvrttóny (24 dílů), třetinotóny (18 dílů), šestinotóny (36 dílů) nebo rozdělit oktávu na úplně jiný počet dílů (např. 13, 15 nebo 17).

Případně lze rozdělit oktávu na 53 rovnoměrných dílů, které odpovídají *holderova kommatu* (viz kapitola 1.6) a z vygenerované tabulky vybrat některé z tónů používaných v tureckém hudebním systému (viz tabulka 1.7). Intervaly se udávají v násobcích *holderova kommatu*. Celý tón zde odpovídá devíti násobkům *holderova kommatu* (204 centů), půltóny čtyřem násobkům (91 centů) nebo pěti násobkům (113 centů), dále se zde vyskytují mikrotóny. Pokud bychom chtěli například osázet hmatník takto vytvořenými celými tóny, použili bychom rozměr každého devátého pražce [16].

Pražcová kalkulačka - počet dílů na oktávu		
Zpět		
Menzura [mm]	Počet pražců	Počet dílů
570	10	10
Změnit		
Rovnoměrně temperované ladění: 10 dílů na oktávu menzura = 570 mm		
Číslo pražce	Vzdálenost od nultého pražce	Vzdálenost od předchozího pražce
1	38.171 mm	38.171 mm
2	73.786 mm	35.615 mm
3	107.016 mm	33.23 mm
4	138.021 mm	31.005 mm
5	166.949 mm	28.928 mm
6	193.94 mm	26.991 mm
7	219.124 mm	25.184 mm
8	242.621 mm	23.497 mm
9	264.545 mm	21.924 mm
10	285 mm	20.455 mm

Obr. 2.19: Pražcová kalkulačka: Počet dílů na oktávu

2.2.4 Shrnutí a návrhy k další optimalizaci programu

Program pražcové kalkulačky je možné bez závažných problémů využít k výpočtu rozměrů pro osazení pražců, pokud jsou všechny parametry pro výpočet zadány správně. Nicméně špatný vstup od uživatele tu není úplně vyřešen, ideální by bylo, kdyby program vypsal nějakou chybovou hlášku a funkci vůbec nespustil, pokud uživatel nezadá žádnou hodnotu. U polí pro zadání počtu pražců, délky menzury, hodnoty v centech a počtu dílů na oktávu je vstup pouze pro celá čísla a počet znaků je omezen. Není tedy možné zadat např. písmena nebo speciální znaky, ale v případě nezadání hodnoty se v tabulce objeví hodnoty „NaN“, které indikují, že výpočet nelze provést.

V případě polí pro zadání poměrů už musí být v HTML vstupní pole nastaveno jako text, kvůli speciálním znakům (desetinná čárka, desetinná tečka, lomítko). Z toho důvodu je možné do pole pro vstup poměrů zapsat i jiné speciální znaky nebo písmena, což opět povede k nějaké chybě, v tomto případě se tabulka vůbec nezobrazí.

Veškeré rozvržení stránky je řešeno pomocí CSS, především s využitím poměrů relativním k rozlišení prohlížeče, takže je program schopný se přizpůsobit např. displeji mobilního telefonu tak, aby bylo vše přehledné a viditelné. Maximální rozlišení šířky bloku, ve kterém se zobrazuje tabulka, bylo omezeno na 800 pixelů, aby sloupce v tabulce nebyly příliš daleko od sebe. Minimální rozlišení je nastaveno na 320 pixelů, menší šířka už by mohla způsobovat nevhodné zalamování textu a různé problémy s rozložením prvků. Pro zvýšení přehlednosti jsou liché řádky (počítáno od hlavičky tabulky) tabulky vykresleny šedou barvou, pro zvýraznění oktáv od prázdné struny byly v tabulkách označeny řádky s těmito hodnotami červeně.

Grafické rozhraní by si jistě zasloužilo řadu vylepšení, především po estetické stránce. Bylo by vhodné upravit rozložení prvků na stránce, konkrétně tlačítek a polí pro zadání hodnot od uživatele. Největší nedostatky v tomto ohledu má pravděpodobně režim pro výpočet z poměrů.

Program by dále bylo možno vylepšit přidáním většího množství různých ladících systémů do režimů s presety a přidáním dalších funkcí pro větší možnosti konstrukce či úpravy ladění. Užitečný by mohl být například režim pro konstrukci ladění na základě hodnot rozladění (v centech) jednotlivých tónů chromatické stupnice od odpovídajících tónů v *rovnoměrně temperovaném ladění*. Za předpokladu dostupnosti tabulek s těmito hodnotami by bylo možné poměrně jednoduše vygenerovat např. různá *nerovnoměrně temperovaná ladění*.

Závěr

Zadáním této práce bylo vyrobit jednoduchý strunný nástroj s posuvnými odnímatelnými pražci a vytvořit program pro výpočet vzdáleností potřebných k opražcování.

V rámci semestrální práce byl sestrojen funkční prototyp nástroje (bakalajka) bez elektrického snímání, později byl nástroj nalakován a opatřen elektromagnetickým snímačem, volume potenciometrem a tónovou clonou. Díky konstrukci posuvných pražců je možno využít tento nástroj pro hraní v různých ladících systémech včetně mikrotonálních systémů.

Bylo uvedeno několik těchto ladících systémů a byl navržen princip přepočtu poměrů mezi tóny na vzdálenosti jednotlivých pražců od nultého pražce a mezi jednotlivými pražci pro využití v pražcové kalkulačce. Pro ověření správnosti vztahů byl vytvořen prototyp pražcové kalkulačky v programu Microsoft Excel. Později byl vytvořen finální program pražcové kalkulačky realizovaný pomocí kombinace jazyků HTML, JavaScript a CSS. Pražcová kalkulačka obsahuje několik přednastavených ladících systémů a umožňuje výpočet rozměrů poloh pražců v těchto ladících systémech pro nástroj *bakalajka* a pro kytaru. Dále obsahuje režim pro výpočet poloh pražců ze zadaných poměrů, režim pro výpočet *rovnoměrně temperovaného ladění* pro libovolný počet dílů na oktávu a režim pro výpočet poloh pražců s nastavitelnou velikostí kroku v centech.

Jedním z rozhodujících faktorů pro volbu provedení pražcové kalkulačky jako webové aplikace byla možnost umístit tuto aplikaci na web. Žádná kalkulačka, která by měla takovéto možnosti na internetu není k dispozici a někteří hudebníci, kteří by chtěli experimentovat s ladícími systémy by tuto aplikaci jistě ocenili.

Stabilita ladění nástroje byla experimentálně ověřena. Bylo nahráno několik tónů a změřena jejich frekvence. Pokud jsou pražce rozměrově uzpůsobeny konkrétní drážce a při hraní se v hmatníku nepohybují, je možné nastavit rozměry vcelku přesně, největší limitace je zde způsob měření. Vzdálenost pražce od nultého pražce by měla být měřena v místě, kde se pražec dotýká struny, v tomto případě uprostřed pražce, což je ale nutné do nějaké míry odhadnout. Vzhledem k rozměrům není problém polohy prvních několika pražců změřit posuvným měřidlem. Tím je bez problému možné měřit s přesností na desetiny milimetrů. Pro měření v polohách, do kterých posuvné měřidlo nedosáhne, byl použit svinovací metr. V tomto případě už je přesnost měření výrazně horší.

Posouvání kamenů s pražci je prováděno pomocí kladívka a kovové tyčinky, která se přiloží na hranu kamene a poklepáním kladívkem na tyčinku se kámen s pražcem posune. Přesnost ladění závisí na přesnosti změření a nastavení daného rozměru, dále také na stylu hry – při příliš silném stisku se mohou struny díky drážkám v hmatníku významně prohnout a v důsledku toho bude výsledný tón o něco vyšší.

Potenciál využití nástroje samotného je na zvážení. Možnost ladění kdykoliv změnit je určitě zajímavá, je ale otázkou kolik lidí by takový strunný nástroj skutečně ocenilo. Změna poloh pražců je poměrně složitá a časově náročná operace, zároveň je třeba mít alespoň nějakou základní znalost problematiky hudebních ladících systémů. Presety pražcové kalkulačky tento problém sice do nějaké míry eliminují, stačí pouze vybrat některé z připravených ladění a upravit polohy pražců, ale i tak je pravděpodobně tento nástroj vhodnější pro někoho, kdo se touto problematikou zabývá více do hloubky.

Literatura

- [1] GEIST, Bohumil. *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, 2005. ISBN 80-86253-31-7.
- [2] PEREZ, Fernando. *Fernando Perez World Music Huitar* [online]. b. r. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://fernandoperezguitar.com/home>
- [3] ÇOĞULU, Tolgahan. *Adjustable Microtonal Guitars* [online]. c2016 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.microtonalguitar.org/>
- [4] Fret Position Calculator. *StewMac* [online]. MacDonald, c2020 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.stewmac.com/fretcalculator.html>
- [5] Harmonic series (music). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Harmonic_series_\(music\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Harmonic_series_(music))
- [6] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 2013. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [7] Pickup Placement Along The Guitar Scale. *Frudua* [online]. Frudua, b. r. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.frudua.com/pickups-placement-along-the-guitar-scale.htm>
- [8] Pythagorean. *Tonalsoft Encyclopedia of Microtonal Music Theory* [online]. b. r. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <http://tonalsoft.com/enc/p/pythagorean.aspx>
- [9] Pythagorean tuning. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pythagorean_tuning
- [10] Just intonation. *Tonalsoft Encyclopedia of Microtonal Music Theory* [online]. Reno (Nevada): Monzo, c2005 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <http://tonalsoft.com/enc/j/just.aspx>
- [11] Musical temperament. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Musical_temperament
- [12] Meantone. *Tonalsoft Encyclopedia of Microtonal Music Theory* [online]. Reno (Nevada): Monzo, c2005 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <http://tonalsoft.com/enc/m/meantone.aspx>

- [13] Středotónové ladění. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Středotónové_ladění
- [14] Musical temperament. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Well_temperament
- [15] Werckmeister temperament. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Werckmeister_temperament
- [16] Turkish makam. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Turkish_makam
- [17] Bağlama. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bağlama>
- [18] *The Online Encyclopedia of Tunings / Sitar* [online]. b. r. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <http://tunings.pbworks.com/w/page/22530640/Sitar>
- [19] Sitar. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sitar>
- [20] The Difference Between Popular Neck Shapes C, V and U. *Fender* [online]. Fender, c2020 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.fender.com/articles/tech-talk/c-u-v-which-neck-shape-is-for-you>
- [21] POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vydanie. Bratislava: Príroda, 1997. ISBN 80-07-00960-4.
- [22] Mandolin. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-5-29]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mandolin>
- [23] Pickups 101: Chapter 2. Pickup Types. *Seymour Duncan* [online]. Santa Barbara (California): Duncan, b. r. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://seymourduncan.zendesk.com/hc/en-us/articles/360047564373-Pickups-101-Chapter-2-Pickup-Types>

- [24] Europe South. *ATLAS of Plucked Instruments* [online]. b. r. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <http://atlasofpluckedinstruments.com/europe3.htm>
- [25] Tone Control Capacitor. *Humbucker Soup* [online]. Humbucker Soup, c2020 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://humbuckersoup.com/tone-control-capacitor-choosing-right-value/>
- [26] *Scala Home Page* [online]. b. r. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <http://www.huygens-fokker.org/scala/>
- [27] *Modartt: Virtual Instruments, physically modelled* [online]. Modartt, c2006–2020 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.modartt.com/>
- [28] MOTOLLA, R. M. Calculating Fret Positions. *Liutaio Motolla Lutherie Information Website* [online]. c2004-2021 [cit. 2021-5-29]. Dostupné z: <https://www.liutaiomottola.com/formulae/fret.htm>
- [29] JavaScript Basics. *MDN Web Docs* [online]. Mozilla, c2005-2021 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Getting_started_with_the_web/JavaScript_basics
- [30] HTML Tutorial. *W3Schools Online Web Tutorials* [online]. Refsnes Data, c1999-2021 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://www.w3schools.com/html/>
- [31] CSS Tutorial. *W3Schools Online Web Tutorials* [online]. Refsnes Data, c1999-2021 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://www.w3schools.com/css/default.asp>
- [32] JANOVSKEÝ, Dušan. CSS - Kaskádové styly. *Jak psát web* [online]. c1999-2021 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: <https://www.jakpsatweb.cz/css/>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

λ	vlnová délka
ρ	hustota
c	rychlost šíření vlny
E	Youngův model pružnosti
f	frekvence tónu
f_0	frekvence základního tónu
f_1	frekvence tónu na prvním pražci
f_n	frekvence tónu o n půltónů výše
k_1	poměr mezi tóny
K_A	akustická konstanta
L	menzura, délka
L_1	délka kmitající části struny pro tón na prvním pražci
L_{1p}	vzdálenost prvního pražce od nultého pražce
L_{np}	vzdálenost n -tého pražce od nultého pražce
m	hmotnost
V	objem
x	počet centů

Seznam příloh

A Elektronické přílohy	63
B Kompletní nástroj	64
C Kameny s pražci	66
D Přípravky pro výrobu kamenů s pražci	67
E Hrubý nákres nástroje	68

A Elektronické přílohy

Archiv obsahuje:

- Program pražcové kalkulačky (složka „Pražcová kalkulačka“)
- Zvukové ukázky nástroje (složka „Nahrávky“)

B Kompletní nástroj

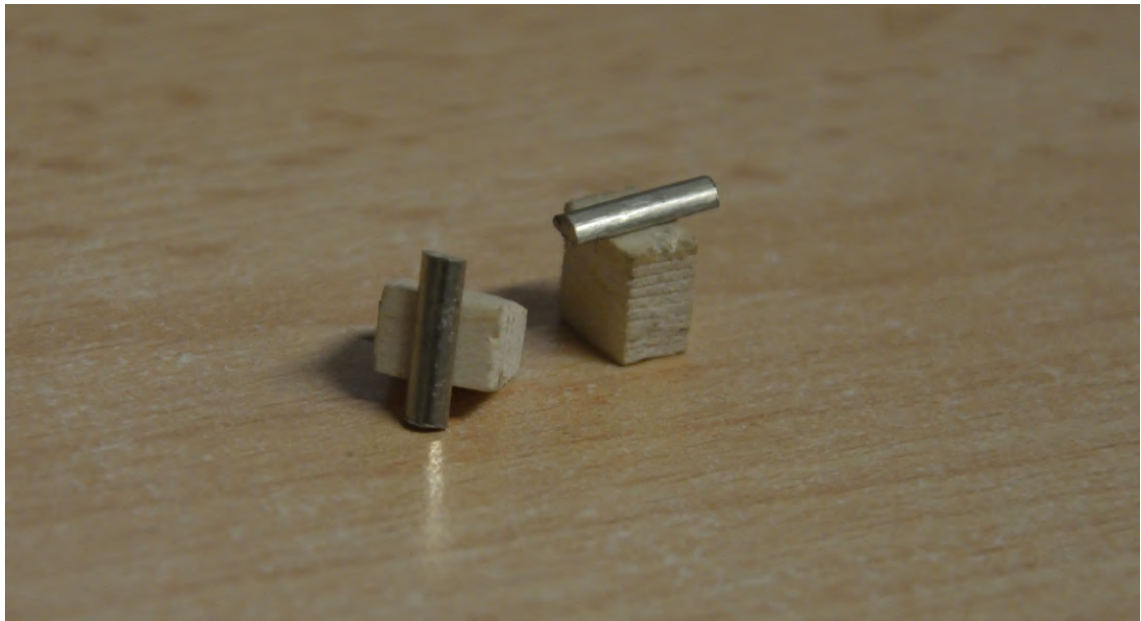


Obr. B.1: Kompletní nástroj



Obr. B.2: Kompletní nástroj – krk

C Kameny s pražci



Obr. C.1: Kameny s pražci

D Přípravky pro výrobu kamenů s pražci

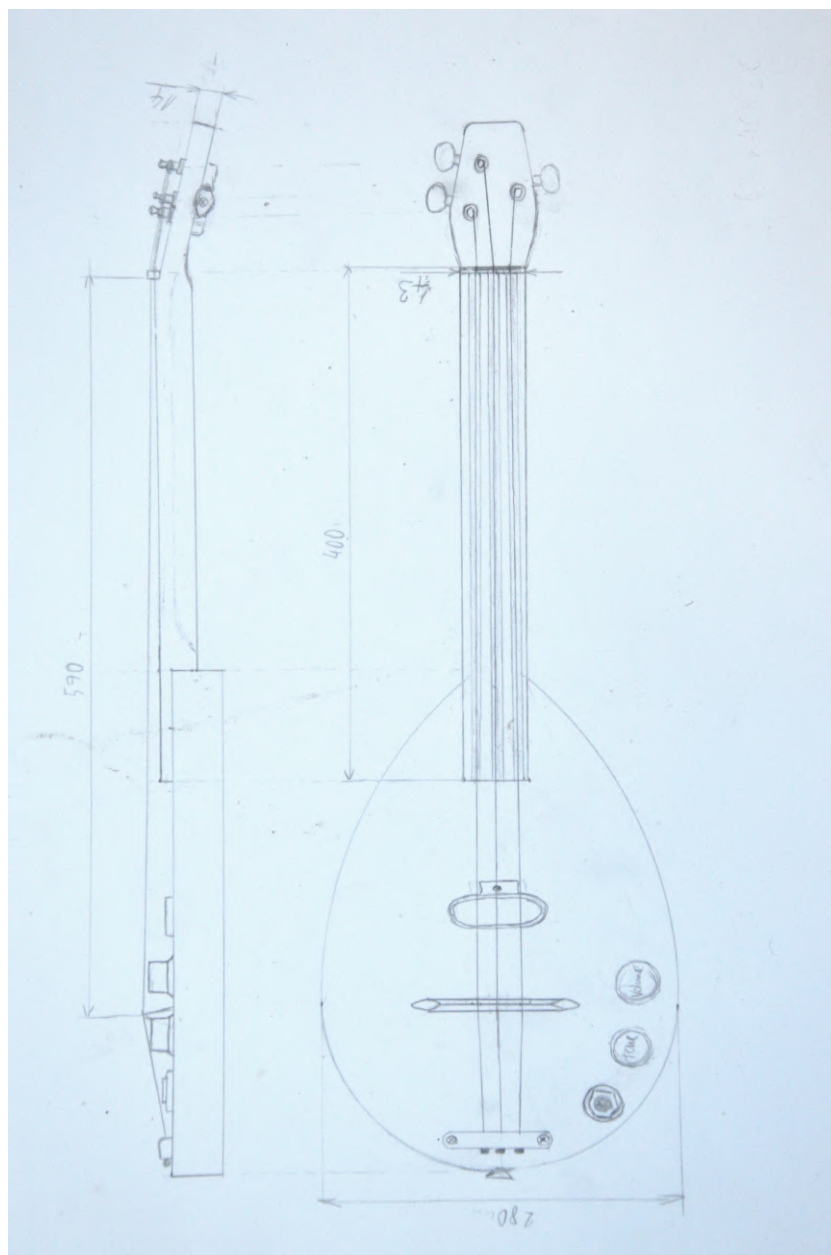


Obr. D.1: Přípravek na výrobu kamenů pro pražce



Obr. D.2: Přípravek pro úpravu pražcového drátu

E Hrubý nákres nástroje



Obr. E.1: Hrubý nákres nástroje